

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
LOUIS LEFEBVRE

IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES SOURCES DE BRUIT
IMPULSIONNELLES, RÉPÉTITIVES ET SYNCHRONISÉES, DANS UN
SYSTÈME MÉCANIQUE COMPLEXE

MONTREAL, AOÛT 2006

(c) droits réservés de Louis Lefebvre

**CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

**Frédéric Laville, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

**Marc Thomas, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

**Thierry Loyau, membre du jury
Institut National de Recherche et Sécurité**

**Bruno Paillard, membre du jury
Directeur recherche et développement, D-Box Inc.**

**ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 14 JUILLET 2006
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES SOURCES DE BRUIT IMPULSIONNELLES, RÉPÉTITIVES ET SYNCHRONISÉES, DANS UN SYSTÈME MÉCANIQUE COMPLEXE

Louis Lefebvre

SOMMAIRE

Le travail présenté dans cette thèse a porté sur l'identification et la caractérisation des sources de bruit impulsionnelles, répétitives et synchronisées, dans les systèmes mécaniques complexes. La problématique a été définie autour de la reconnaissance des sources de bruit avec, comme toile de fond, un système d'entraînement par chenille.

Après une revue des méthodes classiques d'identification des sources de bruit, l'auteur a vérifié leur inadéquation vis-à-vis la problématique. Une nouvelle technique de reconnaissance des sources de bruit a donc été proposée. Cette technique est composée de 3 étapes :

- 1- Caractérisation du système mécanique,
- 2- Caractérisation des sources,
- 3- Reconnaissance des sources.

Pour l'étape de la reconnaissance, plusieurs outils semblaient offrir un potentiel intéressant :

- 1- La corrélation,
- 2- Les distributions temps-fréquence de Wigner-Ville,
- 3- Les ondelettes,
- 4- Le filtrage de signaux temporels.

Le choix, parmi ces méthodes de reconnaissance, s'est fait à l'aide de validations en 3 étapes.

Pour la 1^{ère} étape, des signaux simulés ont été utilisés. Cette étape a permis de faire ressortir les qualités du filtrage de signaux temporels à l'aide de l'inverse de la réponse impulsionnelle comme méthode de reconnaissance. Les autres méthodes proposées se sont avérées inadéquates pour notre problématique.

Pour la 2^{ième} étape, un banc d'essai générant des impacts mécaniques répétitifs a été conçu de façon à pouvoir contrôler différents paramètres : nombre de source, vitesse des impacts, etc. Cette étape a permis de valider les qualités du filtrage de signaux temporels vis-à-vis des signaux réels mais bien contrôlés.

Pour la 3^{ième} étape, un second banc d'essai a été conçu de façon à se rapprocher le plus possible de la problématique industrielle. Le système mécanique utilisé est un ventilateur, composé de roues dentées, d'une chaîne et d'un tendeur de chaîne. Les niveaux d'erreur obtenus à cette étape sont suffisamment faibles pour conclure que le filtrage de signaux temporels peut être utilisé comme méthode de reconnaissance de sources d'impact.

IDENTIFICATION AND CHARACTERISATION OF IMPULSE, REPETTIVE AND SYNCHRONISED NOISE SOURCES IN COMPLEX MECHANICAL SYSTEMS

Louis Lefebvre

ABSTRACT

The work presented in this thesis details the identification and characterisation of impulse, repetitive and synchronised noise sources in complex mechanical systems. The research criterion was focused on the recognition of noise sources, using a tracked propulsion system as an inspiration.

After having reviewed classic methods to identify noise sources, the author counter-checked their inadequacies versus the defined problem. A new technique to identify noise sources was proposed. This technique is comprised of 3 steps :

- 1- Characterisation of the mechanical system,
- 2- Characterisation of the sources,
- 3- Recognition of the source.

For the recognition step, many tools seemed to offer interesting capabilities :

- 1- Correlation,
- 2- Wigner-Ville Time-frequency distributions,
- 3- Wavelets,
- 4- Time filtering.

The capabilities of these recognition methods were tested through 3 validation steps :

- 1- In the first step, simulated signals have been used. This step has shown the capabilities of the time filtering with inverse impulse response technique. The other proposed recognition techniques turned out to be maladapted to solve our recognition problem.
- 2- In the second step, a test bench generating repetitive mechanical impacts was designed so as to give us complete control over several impact parameters such as number of sources, impact speed, etc. This step allowed us to validate time filtering techniques with real but well controlled signals.
- 3- In the third step, another test bench was designed to get closer to the industrial problem. The mechanical system that was designed is a ventilator driven by an electrical motor through a chain that includes a chain tensioner that can be disengaged. The error levels on the results obtained with the time

filtering techniques are low enough to conclude that these techniques can be used for the recognition of impact sources.

REMERCIEMENTS

Nombreuses sont les personnes qui m'ont permis de vivre ces années de thèse dans les meilleures conditions. Je tiens tout d'abord à remercier Frédéric Laville pour la confiance qu'il m'a accordée et pour les nombreux conseils qu'il m'a apportés dans les moments difficiles pour arriver au bout de ce grand défi. Je dois aussi mentionner sa patience et sa constance tout au long de ces années.

Je tiens également à remercier les gens de chez Bombardier Produits Récréatifs pour leur flexibilité lorsque j'en ai eu besoin. Mentionnons aussi que les différents montages qui ont servi pour ce projet ont été réalisés chez Bombardier.

Je tiens à dire un grand merci à ma compagne, Katy. Je suis convaincu que sans elle ce projet n'aurait jamais pu être réalisé. L'ampleur de sa contribution dépasse largement ce qu'elle aurait dû être. Je lui en suis reconnaissant. Un merci aussi à mes enfants, Thierry et Léandre. Non, pendant toutes ces soirées, je ne jouais pas à l'ordinateur, j'y travaillais. Bon, maintenant, j'ai plus de temps libre, qu'est-ce qu'on va en faire?

Tout au long de ce projet, j'ai souvent des pensées pour toi, Maman. Ça m'a aidé à surmonter les découragements et à me motiver. Juste à voir comment Papa semble fier, je suis certain que toi aussi tu le serais. Je t'en dédie un gros morceau, juste pour toi.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	6
1.1 La pression acoustique et l'intensimétrie	6
1.1.1 Pression acoustique	9
1.1.2 L'intensimétrie	11
1.1.3 Adéquation de la pression acoustique et de l'intensimétrie à une problématique particulière, exemple de la chenille	12
1.2 Méthode inverse	13
1.2.1 Adéquation de la méthode inverse à une problématique particulière, exemple de la chenille	17
1.3 L'holographie acoustique	17
1.3.1 Ondes évanescentes	21
1.3.2 Mesure en plusieurs séries	22
1.3.3 Filtre dans le domaine des nombres d'onde	23
1.3.4 Procédure de mesure	23
1.3.5 Antenne de microphones	25
1.3.6 Mesures	25
1.3.7 Adéquation de la NAH à une problématique particulière, exemple de la chenille	26
1.4 La cohérence partielle	26
1.4.1 Adéquation de la cohérence partielle à une problématique particulière, exemple de la chenille	29
1.5 Détection de défaut dans les machines tournantes	29
1.5.1 Adéquation des méthodes de détection de défaut dans les machines tournantes à une problématique particulière, exemple de la chenille	30
1.6 Conclusions de la revue de la littérature	30

CHAPITRE 2	VALIDATION DE L'IFRF À L'AIDE DE SOURCES MONOPOLAIRES	34
2.1	Analyses préliminaires	38
2.2	Erreur sur l'emplacement des microphones	39
2.3	Sources non modélisées	46
2.4	Adéquation de l'IFRF	49
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE POUR LA TECHNIQUE DE RECONNAISSANCE	50
3.1	Description de la méthodologie	50
3.1.1	Caractérisation du système	51
3.1.2	Caractérisation des sources probables	51
3.1.3	Reconnaissance des sources	52
3.1.4	Mise en garde	53
3.2	Exemple du processus d'application de la méthodologie proposée dans le cas d'un système d'entraînement par chenille	53
3.2.1	Caractérisation du système d'entraînement par chenille	54
3.2.2	Caractérisation d'une source probable	56
3.2.3	Reconnaissance du signal du barbotin dans le signal global	56
3.3	Outils nécessaires à chaque étape de la méthodologie	57
3.3.1	Caractérisation du système	57
3.3.2	Caractérisation des sources probables	57
3.3.3	Reconnaissance	58
3.3.3.1	Corrélation	59
3.3.3.2	Distribution temps-fréquence	59
3.3.3.3	Ondelettes	61
3.3.3.4	Filtrage des signaux temporels	64
CHAPITRE 4	VALIDATION DE LA RECONNAISSANCE À L'AIDE DE SIGNAUX SIMULÉS	68
4.1	Signaux simulés utilisés pour l'évaluation des méthodes de reconnaissance	69
4.2	Validation à l'aide de signaux simulés	73
4.2.1	Méthodes de reconnaissance	74
4.2.2	Validation	77
4.2.2.1	Étape 1 : source unique	78
4.2.2.2	Étape 2 : multi sources	89
4.2.2.3	Étape 3 : multi sources, multi fréquences	99
4.2.2.4	Étape 4 : multi sources, impacts simultanés	110
4.2.2.5	Étape 5 : impacts plus rapides	122
4.2.2.6	Étape 6 : 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire en plus	132
4.2.2.7	Étape 7 : 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire	145

4.2.2.8	Étape 8 : 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence	155
4.2.3	Conclusion globale.....	166
CHAPITRE 5	VALIDATION EXPÉRIMENTALE À L'AIDE D'UN BANC D'ESSAI GÉNÉRANT DES IMPACTS MÉCANIQUES RÉPÉTITIFS	168
5.1	Description du banc d'essai	168
5.2	Description et caractérisation des signaux	170
5.3	Validation des méthodes de reconnaissance	174
5.3.1	Signal avec la source de référence seule	175
5.3.2	Signal avec la source de référence et la source 2, impacts non simultanées.....	177
5.3.3	Signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés.....	179
5.3.4	Signal avec la source de référence et la source 2, impacts simultanés .	181
5.3.5	Signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés.....	183
5.3.6	Signal avec les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés	185
5.4	Conclusion	187
CHAPITRE 6	VALIDATION EXPÉRIMENTALE À L'AIDE D'UN SYSTÈME MÉCANIQUE D'ENTRAÎNEMENT PAR CHAÎNE	189
6.1	Définition du système mécanique	190
6.2	Caractérisation de la source à reconnaître.....	192
6.3	Reconnaissance	193
6.3.1	Prise de mesure	193
6.3.2	Définition du signal de référence	194
6.3.3	Application du filtrage des signaux temporels.....	196
6.4	Conclusion sur l'application de la méthode à un système mécanique ..	200
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		202
BIBLIOGRAPHIE		206
ANNEXE 1	Filtrage adaptatif de type RLS	210

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Méthodes classiques d'identifications des sources de bruit32
Tableau II	Caractéristiques des sources de bruit pour le modèle analytique37
Tableau III	Localisation des microphones utilisés dans le modèle analytique37
Tableau IV	Définition des termes utilisés dans cette section73
Tableau V	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec signaux contenant une source83
Tableau VI	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal contenant plusieurs sources ayant chacune une fréquence de rayonnement93
Tableau VII	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal ayant plusieurs sources composées de plusieurs fréquences de rayonnement104
Tableau VIII	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de plusieurs sources ayant des impacts simultanés116
Tableau IX	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de plusieurs sources, plusieurs fréquences, impacts simultanés plus rapides126
Tableau X	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire en plus138
Tableau XI	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire149
Tableau XII	Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence, (signal global 62,8 dB)159
Tableau XIII	Description des différentes sources utilisées pour les validations171
Tableau XIV	Vitesse de rotation du moteur lors des mesures sur le système mécanique d'entraînement par chaîne195
Tableau XV	Énergie du système mécanique, avec et sans tendeur en fonction de la vitesse de rotation196

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Mesure de puissance acoustique d'un ensemble moteur en camouflant les sources individuellement.....8
Figure 2	Calcul de la puissance acoustique à l'aide de mesure de pression par camouflage de sources9
Figure 3	Mesure de puissance acoustique à l'aide d'une sonde d'intensité.....11
Figure 4	Montage de l'antenne lors de mesure d'TFRF, les microphones sont en noirs14
Figure 5	Plan de mesure d'holographie sur un ensemble moteur19
Figure 6	Des séquences durant les mesures d'holographie.....19
Figure 7	Définition d'un système composé de 2 sources.....27
Figure 8	Représentation géométrique des sources (en bleu), des source variables (en vert) et microphones (carrés noirs). Les plans en gris sont là pour représenter les plans XY, YZ et ZX.38
Figure 9	Variation sur l'emplacement d'un microphone41
Figure 10	Variation sur l'emplacement de 2 microphones41
Figure 11	Variation sur l'emplacement des 6 microphones42
Figure 12	Variation de l'emplacement de 1 microphone, fréquence de source à 40Hz.....43
Figure 13	Variation de l'emplacement de 2 microphones, fréquence de source à 40Hz.....43
Figure 14	Variation de l'emplacement des 6 microphones, fréquence de source à 40Hz.....44
Figure 15	Variation de l'emplacement de 1 microphone, fréquence de source à 4000Hz.....44
Figure 16	Variation de l'emplacement de 2 microphones, fréquence de source à 4000Hz.....45
Figure 17	Variation de l'emplacement des 6 microphones, fréquence de source à 4000Hz.....45
Figure 18	Ajout de une source de bruit non modélisée, similaire à du bruit de fond46

Figure 19	Ajout de une source de bruit non modélisée près de la source 1, similaire à du bruit de fond.....	47
Figure 20	Ajout de deux sources de bruit non modélisées, une près de la source 1 et l'autre à un endroit quelconque, similaire à du bruit de fond.....	47
Figure 21	Ajout de deux sources de bruit non modélisées, une près de la source 1 et l'autre à un endroit quelconque, similaire à du bruit de fond, fréquence des sources à 40Hz.....	48
Figure 22	Ajout de deux sources de bruit non modélisées, une près de la source 1 et l'autre à un endroit quelconque, similaire à du bruit de fond, fréquence des sources à 4000Hz.....	48
Figure 23	Système d'entraînement par chenille et les principales sources de bruit .	54
Figure 24	Arbre de décomposition par ondelettes, A signifie approximation (passe bas dans ce cas), et D signifie détail (passe haut dans ce cas).....	62
Figure 25	Exemple de décomposition par ondelettes avec seulement les branches significatives montrées	64
Figure 26	Exemples de signaux générés. Premier signal : signal presque complètement amorti entre les impacts, donc bien distincts. Deuxième signal : signaux peu amortis entre les impacts, donc peu distincts	71
Figure 27	Variations dans les signaux générés (premier signal de la figure 26)	72
Figure 28	Résultats de corrélation d'un signal ayant 1 fréquence	84
Figure 29	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal ayant 1 fréquence	85
Figure 30	Résultats de la distribution CWT d'un signal ayant 1 fréquence	86
Figure 31	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal ayant 1 fréquence	87
Figure 32	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal ayant 1 fréquence	88
Figure 33	Résultats de corrélation d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence	94
Figure 34	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence	95
Figure 35	Résultats de la distribution CWT d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence	96
Figure 36	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence	97

Figure 37	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal ayant 2 sources d'une fréquence98
Figure 38	Résultats de corrélation d'un signal de 3 sources de 3 fréquences..... 105
Figure 39	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 3 sources de 3 fréquences 106
Figure 40	Résultats de la distribution CWT d'un signal de 3 sources de 3 fréquences..... 107
Figure 41	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 3 sources de 3 fréquences 108
Figure 42	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 3 sources de 3 fréquences 109
Figure 43	Résultats de corrélation d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence...117
Figure 44	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence 118
Figure 45	Résultats de la distribution CWT d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence 119
Figure 46	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence 120
Figure 47	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal ayant 2 sources d'une fréquence 121
Figure 48	Résultats de corrélation d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides 127
Figure 49	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides 128
Figure 50	Résultats de la distribution CWT d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides 129
Figure 51	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides 130
Figure 52	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides 131
Figure 53	Résultats de corrélation d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus..... 139
Figure 54	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus 140

Figure 55	Résultats de la distribution CWT d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus	141
Figure 56	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus	142
Figure 57	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus	143
Figure 58	Évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre	144
Figure 59	Valeur de l'impulsion avec bruit aléatoire de 4 dB en plus (courbe du haut) et bruit aléatoire de 15 dB (courbe du bas)	145
Figure 60	Résultats de corrélation d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire.....	150
Figure 61	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire.....	151
Figure 62	Résultats de la distribution CWT d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire	152
Figure 63	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire	153
Figure 64	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire	154
Figure 65	Résultats de corrélation d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence.....	160
Figure 66	Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence.	161
Figure 67	Résultats de la distribution CWT d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence	162
Figure 68	Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence	163
Figure 69	Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence	164
Figure 70	Valeur des impulsions à différents endroits en l'absence de la source de référence	165

Figure 71	Évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre dans le cas d'absence de la source de référence	166
Figure 72	Banc d'essai pour la validation expérimentale.....	169
Figure 73	Impact de la butée sur une plaque	170
Figure 74	SWVD de l'impact du marteau sur la plaque de référence	172
Figure 75	SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de référence	172
Figure 76	SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de la source 2	173
Figure 77	SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de la source 3	173
Figure 78	SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de la source 4.....	174
Figure 79	SWVD du signal avec la source de référence seule	175
Figure 80	Évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé.....	176
Figure 81	Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence seule en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)	177
Figure 82	SWVD du signal avec la source de référence et la source 2, impacts non simultanés.....	178
Figure 83	Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et la source 2, impacts non simultanés, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches).....	179
Figure 84	SWVD du signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés.....	180
Figure 85	Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)	181
Figure 86	SWVD du signal avec la source de référence et la source 2, impacts simultanés.....	182
Figure 87	Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et la source 2, impacts simultanés, en utilisant le filtrage temporel des signaux (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)	183
Figure 88	SWVD du signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés.....	184

Figure 89	Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)	185
Figure 90	SWVD du signal avec les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés.....	186
Figure 91	Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés, en utilisant un filtrage temporel	187
Figure 92	Système mécanique pour l'application de la méthode	191
Figure 93	Distribution temps-fréquence, spectre et trace temporelle d'un impact généré avec un marteau d'impact sur le tendeur	192
Figure 94	Distribution temps-fréquence, spectre et trace temporelle d'un second impact généré avec un marteau d'impact sur le tendeur	193
Figure 95	Trace temporelle du signal global avec tendeur pour une vitesse de rotation de 200 RPM	195
Figure 96	Ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre pour une vitesse de 200 RPM.....	195
Figure 97	Reconnaissance du signal de référence dans le signal global pour une vitesse de rotation de 200 RPM, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches).....	198
Figure 98	Reconnaissance du signal de référence dans le signal global pour une vitesse de rotation de 270 RPM, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches).....	199
Figure 99	Niveau d'énergie du tendeur, estimé et calculé.....	200
Figure 100	Extraction d'un signal de référence contenu dans un signal global à l'aide d'un filtre adaptatif	211

INTRODUCTION

Problématique générale et industrielle

Le domaine de la motoneige est un milieu très compétitif. Les 4 manufacturiers présents se disputent un marché d'environ 150 000 véhicules annuellement. Il est donc important d'être bien à l'écoute de ses clients. Les tendances générales vont vers la performance et la légèreté des véhicules. Depuis quelques temps, une autre tendance se manifeste : le confort de roulement. En effet, depuis quelques années, de plus en plus de clients manifestent le désir d'avoir des véhicules plus silencieux. Bombardier Produits Récréatifs souhaite répondre aux attentes de ses clients et même, si possible, attirer de nouveaux usagers vers la motoneige en offrant des véhicules plus silencieux.

Des études préliminaires internes à Bombardier ont montré que la source principale de bruit à l'opérateur, en condition de sentier, est le système d'entraînement par chenille. Cette source de bruit représente environ 50% du bruit total à 80 km/h. Les autres sources de bruit sont le moteur, le système d'échappement et le système de transmission par courroie. Afin d'obtenir une réduction significative il faut absolument s'attaquer à la source principale.

Les tentatives passées, en 1993 et 1996-97, furent toutes vaines. Certaines modifications apportées ont montré une réduction d'amplitude de la fréquence dominante mais l'énergie totale n'a pas été réduite. Les modifications apportées portaient surtout sur un espacement aléatoire des crampons, dents de traction et autres composantes de la chenille. Probablement que ces modifications font parties de la solution finale mais, à elles seules, elles ne sont pas suffisantes. Il faut donc pousser un peu plus cette étude.

Il faut tout d'abord trouver d'où vient le bruit? Quelles sont les composantes qui génèrent le bruit et de quelles façons? Il faut donc trouver une méthode qui permettra d'identifier et de quantifier les sources de bruit. Ensuite, chacune des sources pourra être décortiquée et modifiée afin de générer moins de bruit.

Problématique scientifique

Plusieurs méthodes de mesure et d'analyse existantes permettent d'identifier et de quantifier les sources de bruit dans les systèmes mécaniques. Chacune de ces méthodes possède des avantages et des inconvénients. Pour différentes raisons, que l'auteur expliquera dans la revue de la littérature, ces méthodes ne permettent pas de répondre adéquatement à la problématique spécifique de l'identification de sources de bruit impulsionnelles lorsque celles-ci résultent d'impacts périodiques générés à la même fréquence, ce qui est le cas du système d'entraînement par chenille de la motoneige.

Objectifs

Le but principal de ce doctorat est de développer une méthodologie permettant d'identifier et caractériser les sources de bruit semi cohérentes dans des systèmes mécaniques complexes où les méthodes classiques ne peuvent être utilisées. Elles sont dites semi cohérentes pour 2 raisons. Premièrement, elles sont cohérentes parce qu'elles sont essentiellement périodiques, avec la même période. Deuxièmement, il peut y avoir des fluctuations d'un impact à l'autre, ce qui induit un phénomène aléatoire dans le système.

Plusieurs incitatifs ont mené au développement de cette méthodologie. La problématique souvent mentionnée est celle d'un système d'entraînement par chenille. Il s'agit en fait de la problématique qui a soulevé plusieurs questions autour de la reconnaissance des sources de bruit. Ce sont ces questions qui sont à la base de ce

projet de doctorat. Donc ce doctorat se veut plus une réponse aux questions de reconnaissance des sources de bruit de type impacts répétitifs en général qu'une méthode permettant d'identifier les sources d'une chenille. La méthodologie proposée pourra servir dans un projet de réduction de bruit des chenilles mais il s'agira alors d'un autre projet. Il faut toutefois noter, qu'à certaines occasions, la problématique de la chenille servira d'exemple pour soutenir le développement de la méthodologie.

Démarche de recherche et plan de thèse

La méthodologie permettant d'identifier et caractériser les sources de bruit semi cohérentes est vue comme une technique spécifique de reconnaissance des sources de bruit dans un signal global. Les sources seront caractérisées individuellement à l'aide d'une excitation externe et leur signal sera reconnu dans le signal global en développant une méthode basée sur différentes méthodes de reconnaissance de signal existantes. La méthode sera validée à l'aide de simulations numériques puis avec des mesures expérimentales prises sur deux montages simplifiés de systèmes mécaniques conçus à des fins de validation de la méthode.

Le chapitre 1 de cette thèse est la revue de la littérature. Cette revue portera sur les différentes méthodes de reconnaissance des sources de bruit. En tout, 4 méthodes seront vues :

- 1- La pression acoustique et l'intensimétrie,
- 2- La méthode inverse,
- 3- L'holographie acoustique,
- 4- La cohérence partielle.

Les méthodes d'identification de défaut dans les machines tournantes (roulements à billes par exemple) seront également revues. Le fonctionnement de chacune de ces méthodes sera présenté en soulignant leurs forces et lacunes. Ensuite, leur adéquation à

la problématique de recherche terminera chaque présentation. Parce que la méthode inverse, a démontré une certaine adéquation à la problématique, elle fera l'objet d'un examen plus approfondi à l'aide de simulations utilisant des sources monopolaires dans un chapitre à part, le chapitre 2.

Le chapitre 3 portera sur la méthodologie proposée pour la technique de reconnaissance, suivra la description de la technique de reconnaissance ainsi qu'un exemple d'application à un système d'entraînement par chenille. Ensuite les outils nécessaires à chaque étape de la technique de reconnaissance seront présentés. Il s'agit de :

- 1- Caractérisation du système,
- 2- Caractérisation des sources,
- 3- Reconnaissance des sources.

La reconnaissance des sources peut se faire à l'aide de plusieurs méthodes. Les plus intéressantes, 4 en tout, ont été choisies afin de couvrir une gamme de possibilités la plus vaste possible. Ces méthodes seront détaillées dans cette section; il s'agit de :

- 1- La corrélation,
- 2- Les distributions temps-fréquence Wigner-Ville,
- 3- Les ondelettes,
- 4- Le filtrage des signaux temporels.

Les 3 derniers chapitres porteront sur les validations. La première série de validations (chapitre 4) sera faite à l'aide de signaux simulés. Dans ce chapitre, les 4 méthodes de reconnaissance présentées à la section précédente seront reprises. Cette première série de validation a pour but d'éliminer les méthodes de reconnaissance les moins performantes pour le type de problématique qui nous concerne.

Les méthodes de reconnaissance les plus prometteuses seront utilisées dans une deuxième série de validation (chapitre 5). Ces validations seront faites à l'aide de

signaux expérimentaux provenant d'un premier banc d'essai spécifiquement construit dans le but de simuler des sources de bruit représentatives de la problématique, soit des sources impulsionnelles, répétitives et synchronisées.

Comme dernière validation (chapitre 6), l'auteur validera cette technique d'identification des sources à l'aide d'un deuxième banc d'essai : un système d'entraînement par chaîne. Une des sources de bruit du système sera choisie comme source de référence. Son énergie sera estimée à l'aide de la nouvelle méthode d'identification. L'énergie de la source référence sera aussi obtenue en utilisant une technique de fractionnement du système : le système mécanique sera opéré avec et sans la source de référence et par soustraction, l'énergie de la source de référence sera obtenue. La validation de la nouvelle technique se fera en comparant les niveaux d'énergie estimé et calculé par fractionnement du système.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de la littérature fera un résumé des méthodes classiques d'identification des sources de bruit. Les méthodes classiques étudiées sont :

- 1- La pression acoustique et l'intensimétrie;
- 2- La méthode inverse;
- 3- L'holographie acoustique;
- 4- La cohérence partielle;
- 5- Les méthodes d'identification de défaut dans les machines tournantes.

Pour chaque méthode présentée, l'auteur vérifiera leur adéquation à une problématique en utilisant le système d'entraînement par chenille comme exemple. Un résumé sur l'adéquation de ces différentes méthodes d'identification complétera ce chapitre.

1.1 La pression acoustique et l'intensimétrie

Il y a plusieurs approches possibles pour identifier les sources de bruit d'un système mécanique à l'aide de la pression acoustique ou de l'intensimétrie (Bies, 1996, Crocker et Ivanov, 1993, Dumbacher, 1995, Tretheway et Christofi, 1987, Ehlbeck et Schrader, 1989, Jiang et Whittlesey, 1989 et Temple, 1997). Les plus fréquemment utilisées sont :

- 1- Analyse fréquentielle à partir du spectre (Beranek et Ver, 1992, Goldman, 1991 et Temple, 1997);
- 2- Fractionnement du système en plusieurs sources (Crocker et Ivanov, 1993);
- 3- Encoffrement ou camouflage partiel.

Voici une brève description de chacune de ces méthodes.

1- Analyse fréquentielle Si les différentes sources n'ont pas la même signature fréquentielle (fréquence de passage ou d'occurrence de l'événement), comme un système à engrenages par exemple (Beranek et Ver, 1992), il est possible de déterminer à l'aide d'un spectre de puissance acoustique la contribution de chacune des sources (Goldman, 1991 et Temple, 1997). Les fréquences correspondant à chacun des éléments du système sont identifiées, il est alors possible de trouver l'énergie ou la puissance correspondant à chacune des sources.

2- Fractionnement du système Une autre approche consiste à fractionner les systèmes en sous-ensembles (sources indépendantes) et de les faire fonctionner indépendamment (Crocker et Ivanov, 1993). Leur puissance acoustique peut ainsi être mesurée. Il faut cependant que le fractionnement n'altère pas les caractéristiques des sources de bruit.

3- Encoffrement ou camouflage partiel Il est possible de discrétiser les différentes sources en effectuant du camouflage ou de l'encoffrement partiel (figure 1). Ce principe, quoique facile à comprendre, est très difficile à mettre en œuvre. Il s'agit de camoufler toutes les sources individuellement et de les « découvrir » une à la fois en mesurant leur puissance acoustique. La qualité des mesures dépend beaucoup de la qualité des encoffrements. Il faut que la différence entre les niveaux de bruit original et entièrement camoufler soit supérieure à 10 dBA (Bies et Hansen, 1996). Il est même souhaitable d'avoir une différence supérieure à 15 dBA afin de bien caractériser les sources les plus faibles.



Figure 1 Mesure de puissance acoustique d'un ensemble moteur en camouflant les sources individuellement

Toutes ces approches nécessitent la connaissance de la puissance acoustique. Habituellement, la puissance acoustique peut être obtenue à l'aide de plusieurs méthodes de mesure. Les plus classiques sont l'intensimétrie et la pression acoustique (figure 2). L'intensimétrie (Donavan, 1993 et Mason et Bartoshesky, 1993) est l'une des méthodes les plus fréquemment utilisée. Ces 2 méthodes de mesures de puissance acoustique seront revues plus en détail ainsi que leur adéquation à une problématique en utilisant le système d'entraînement par chenille comme exemple.

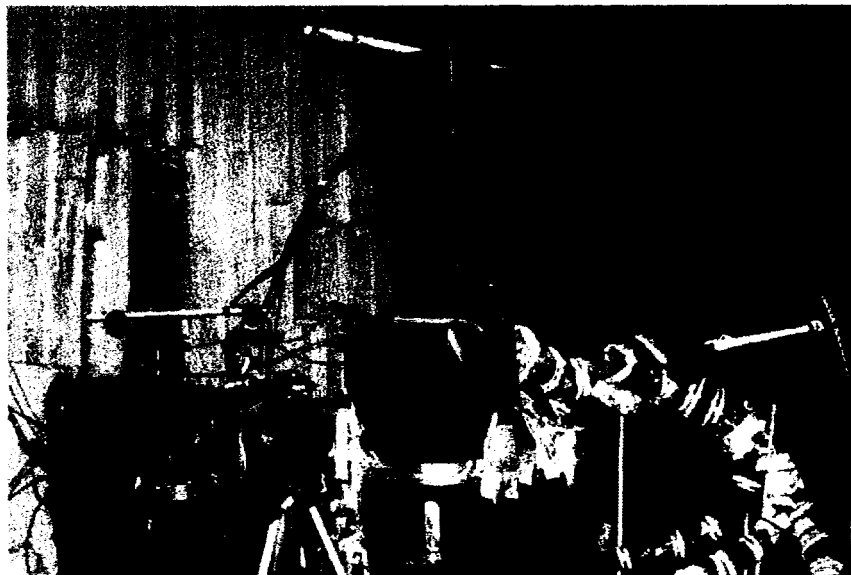


Figure 2 Calcul de la puissance acoustique à l'aide de mesure de pression par camouflagement de sources

1.1.1 Pression acoustique

Les mesures de pression acoustique pour identifier les sources de bruit sont faites dans le but de déterminer la puissance acoustique (figure 2). Il existe plusieurs méthodes reconnues pour déterminer la puissance acoustique à partir de mesure de pression acoustique. Le choix de la méthode dépend en grande partie de la précision voulue, de la présence d'autres sources, de l'environnement de la source (surface réfléchissante) et s'il est possible de faire fonctionner la source dans un autre environnement. Bies et Hansen (1996) définissent 3 types de méthodes pour atteindre ce but : mesures en champ libre ou semi libre, mesures en champ diffus et mesures in situ.

Si la source peut être en fonction en champ libre, le plus souvent dans une chambre anéchoïque, les normes suivantes ISO 3745 – 1977, ANSI S1.35 – 1979a et AS1217.5 – 1985a décrivent bien la procédure à suivre. Dans le cas où la source serait en champ semi libre, la ou les réflexions doivent être négligeables ou traitées comme d'autres

sources. Il est également possible de faire ce genre de mesure dans un local très vaste en suivant les procédures suivantes ISO 3744 – 1994a (dans ce cas-ci, l'intensité est obtenue à partir de mesures de pression acoustique), ANSI S1.34 – 1980 et AS1217.6 – 1985b. Dans ces normes, la puissance acoustique est déterminée en intégrant l'intensité autour d'une surface hypothétique sphérique entourant la source. Le rayon de la sphère doit être choisi de façon à ce que la pression mesurée puisse être directement transformée en intensité acoustique : la pression mesurée peut approcher l'intensité acoustique lorsque le point de mesure est situé en champ acoustique et géométrique lointain pour que l'erreur d'angle et l'erreur d'impédance soient très faibles.

Pour les mesures en champ diffus, il faut que les dimensions et le volume du local soient adéquats. Les murs doivent être acoustiquement rigides pour la gamme de fréquences étudiée. Le temps de réverbération doit être mesuré et le coefficient d'absorption des murs doit être inférieur à 0,06 pour toute la gamme de fréquence (Bies et Hansen, 1996). Deux méthodes peuvent être utilisées en champ diffus. La première, appelée méthode de substitution, consiste à mesurer le champ de pression acoustique moyen avec la source dans l'environnement diffus. Ensuite la source est remplacée par une autre source de référence dont on connaît la puissance acoustique. Le champ de pression acoustique est alors mesuré avec cette nouvelle source. Il est alors possible de calculer la puissance acoustique de la source originale. La deuxième méthode, appelée méthode absolue, consiste à calculer les propriétés d'absorption du local à partir des mesures du temps de réverbération. La pression acoustique moyenne de la source est alors mesurée. La puissance acoustique peut être calculée à partir de ces informations (Beranek, 1971).

Si le local n'a pas les caractéristiques de champ libre ou semi libre et si la source ne peut être déplacée dans un meilleur environnement, les mesures doivent être faites sur place. Ce genre de mesures nécessite beaucoup de précaution. Bies et Hansen (1996) font une bonne description des alternatives disponibles dans ce genre de situation. Les

normes et procédures suivantes sont des outils importants pour ce genre de mesure : AS1217.7 – 1985c, ANSI S1.36 – 1979b, ISO 3746 – 1979 et ASTM E1125 - 1986.

1.1.2 L'intensimétrie

La mesure directe de l'intensité acoustique des sources est possible en utilisant une sonde d'intensité acoustique (figure 3). Il existe plusieurs normes et procédures de mesures, telles ISO 9614/1 1993 et ISO 9614/2 1994b. Les mesures d'intensité acoustique permettent de déterminer l'amplitude et la direction du flux d'énergie à n'importe quel endroit dans l'espace. Pour obtenir la puissance acoustique d'une source il faut mesurer et moyenner l'intensité acoustique sur une surface imaginaire entourant complètement la source (Bies et Hansen, 1996).

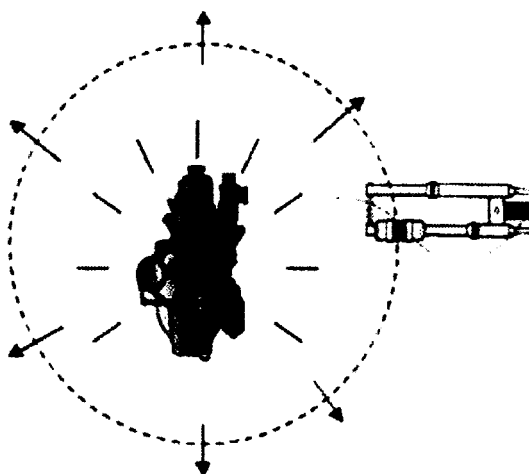


Figure 3 Mesure de puissance acoustique à l'aide d'une sonde d'intensité

En théorie, ces mesures peuvent être faites en champ proche, en présence de surface réfléchissante et près d'autres sources de bruit. L'énergie venant d'autres sources passera par la surface de mesure en un point donné et en ressortira par un autre. Le

bilan énergétique sera nul. Toutefois si le champ réactif associé aux surfaces réfléchissantes ou aux sources avoisinantes est 10 dBA ou plus que le champ actif de la source, des mesures d'intensité acoustique ne peuvent être faites. La pression acoustique des 2 microphones sera grande comparativement à la variation entre les deux.

L'information obtenue à l'aide de mesure d'intensité acoustique peut être difficile à interpréter. Il n'est pas rare, pour une surface en vibration, d'avoir des zones d'absorption, intensité négative, et des zones de rayonnement, intensité positive. Obtenir une image complète des flux acoustiques devient alors très compliqué. Il faut donc prendre plus de points de mesure. Il est également recommandé de faire les mesures en champ libre ou semi libre si possible. Mais il est également possible de faire ces mesures près des sources rayonnantes en champ réverbérant (ANSI S12.12 – 1992). Les erreurs et les limitations de ce genre de mesures sont présentées dans Fahy (1989).

1.1.3 Adéquation de la pression acoustique et de l'intensimétrie à une problématique particulière, exemple de la chenille

Ce type de méthode d'identification ne peut être utilisé adéquatement pour identifier les sources de bruit dans un système d'entraînement par chenille. Les limitations spécifiques à ce type de système mécanique sont, en particulier, le nombre de sources probables, leurs similitudes fréquentielles et l'impossibilité de faire du camouflage sans altérer le fonctionnement du système. Les mesures de pression acoustique, pour être efficace, doivent être faites avec une seule source à la fois, ce qui est impossible à réaliser dans ce cas. Par contre ce type de mesure pourrait servir à évaluer la puissance acoustique totale du système d'entraînement par chenille.

L'intensimétrie possède, dans ce cas, les mêmes limitations que les mesures de pression acoustique. Par contre, il serait possible d'évaluer la puissance acoustique du système au complet. Il serait même possible d'identifier les zones où l'énergie acoustique serait la plus concentrée, ce qui ne serait qu'une identification peu précise de la source de bruit.

1.2 Méthode inverse

Si les méthodes de pression acoustique ou d'intensimétrie ne peuvent être mises de l'avant il faut se tourner vers des méthodes de mesure différentes. Il existe des méthodes permettant de quantifier les sources de bruit sans changer le système mécanique. Parmi celles-ci, les plus connues sont l'holographie acoustique et la méthode inverse. Ces méthodes utilisent des vecteurs de microphones appelés antennes acoustiques pour la méthode inverse et plan de mesure pour l'holographie acoustique. Cette section traitera de la méthode inverse. Mentionnons que la plupart de l'information de cette section vient des références suivantes : Dumbacher et Brown (1995, 1997 et 1998).

L'IFRF est l'abréviation anglaise de « Inverse Frequency Response Function ». Cette technique de mesure permet de faire l'analyse des chemins de transfert acoustique, la localisation de sources, la hiérarchisation des sources et de l'imagerie acoustique (Dumbacher et Brown, 1996a et 1996b). Cette technique nécessite la connaissance des fonctions de réponse en fréquence (FRF) entre les sources suspectées et les microphones composant le vecteur ou l'antenne (figure 4). Cette méthode est utilisée à la place de l'holographie quand la surface des sources est irrégulière.

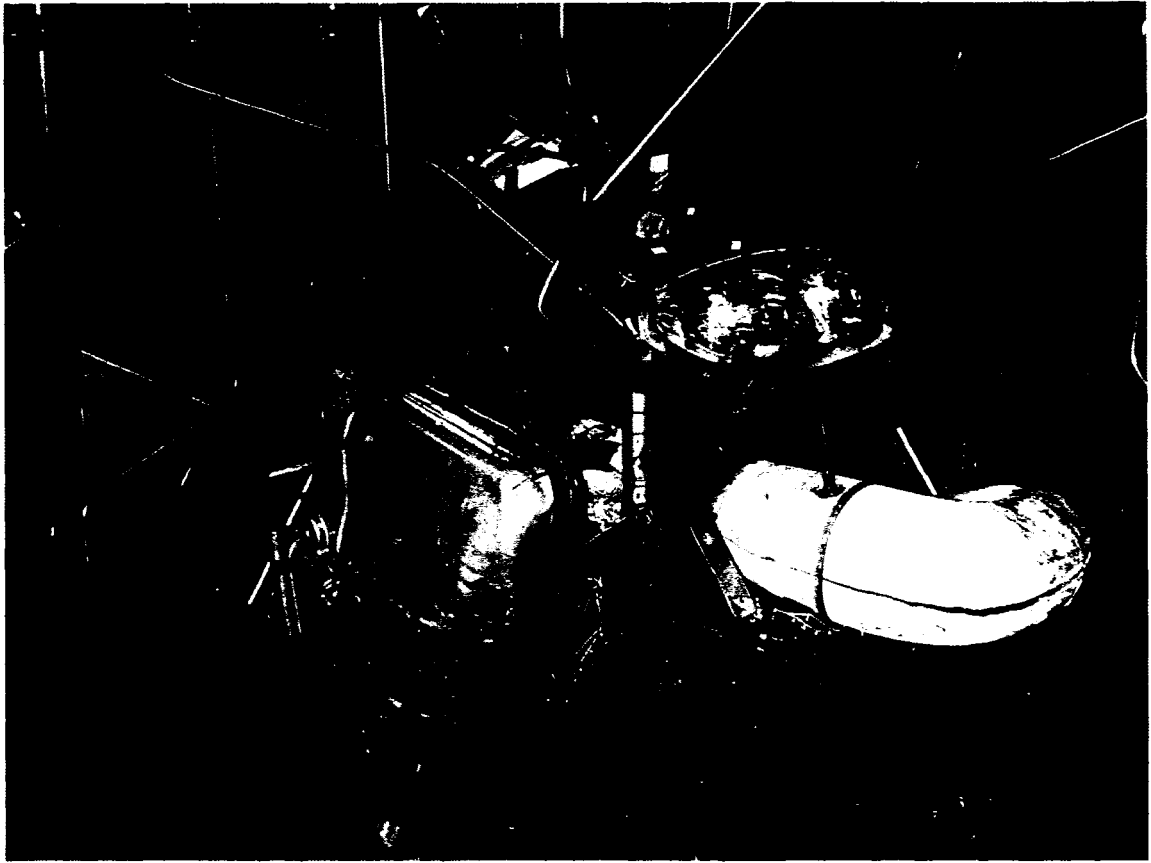


Figure 4 Montage de l'antenne lors de mesure d'IFRF, les microphones sont en noirs

Les FRF peuvent être mesurées (à l'aide de haut-parleurs et de microphones) ou calculées (approximation par monopole, dipôle ou quadripôle). Les sources peuvent être structurales ou acoustiques. Le système d'équations est composé d'entrées (sources) et de sorties (microphones), liées entre elles par les FRFs. Il est donc possible d'extraire par calcul la contribution des sources en connaissant le niveau sonore des microphones de l'antenne.

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (1.1)$$

Où

$\{X(\omega)\}$ est la FFT du vecteur microphone contenant les valeurs de pression acoustique;

$[H(\omega)]$ est la matrice des FRF entre les sources et les microphones;

$\{F(\omega)\}$ est la FFT vecteur de contribution des sources.

En résolvant pour les sources :

$$\{F(\omega)\} = [H(\omega)]^+ \{X(\omega)\} \quad (1.2)$$

Où $[H(\omega)]^+$ est la pseudo inverse de la matrice des FRF.

La théorie derrière l'IFRF est très simple. La matrice des FRF entre les sources et l'antenne de microphones est déterminée à l'aide de mesures expérimentales ou par un modèle analytique. La pseudo inverse de cette matrice est utilisée pour convertir les mesures de pression acoustique à l'antenne en contribution acoustique des sources. La matrice des FRF contient toutes les contributions d'une source donnée, incluant les réflexions ou la réverbération.

Le conditionnement de la matrice des FRF est très important. Le nombre de microphones utilisés, la configuration de l'antenne, le nombre de sources et le nombre de modes acoustiques contenus dans la bande de fréquence d'intérêt sont les paramètres les plus influents sur le conditionnement de la matrice. Si le conditionnement de la matrice est déficient, le bruit aura une influence plus significative. Le bruit peut être causé par des sources acoustiques non modélisées, des variations non stationnaires, l'environnement acoustique, les appareils de mesure et plusieurs autres facteurs non contrôlés.

Afin de diminuer l'effet des sources non modélisées ou si l'on ne connaît pas le nombre exact de sources, il est possible de supposer la présence de sources dites "virtuelles". La contribution calculée de ces sources virtuelles permettra de conclure à leur présence ou à leur absence. Il est évident, pour de raisons de précision de calcul et de conditionnement de matrice, que le système ne peut avoir un nombre infini de sources.

Comme les calculs se font fréquence par fréquence, le conditionnement est aussi fonction de la fréquence. Près de modes acoustiques forts et faiblement amortis, le conditionnement peut être faible à cause de la très forte contribution du mode dominant. Dans le cas de modes acoustiques forts, le rang de la matrice des FRF peut être petit en comparaison du nombre d'inconnues. Ce type de problème est commun pour toutes les méthodes utilisant des fonctions inverses pour trouver la valeur des entrées. Même en utilisant des méthodes statistiques efficaces, comme la SVD (de l'anglais « Singular Value Decomposition ») par exemple, la solution trouvée peut ne pas être unique ou même être une résultante des sources ou facteurs en présence. Ce problème est équivalent à essayer de trouver les forces agissant sur un corps rigide. Si le nombre de forces est plus grand que 6, il est alors seulement possible de trouver les 6 forces résultantes et non les forces actuelles.

Pour améliorer le conditionnement de la matrice, il est possible de prendre des points de mesure près des sources. Ces points de mesure sont souvent influencés par les modes locaux ou résiduels. C'est particulièrement vrai pour les modes acoustiques où, près de la source, les ondes sont évanescences. Ces ondes évanescences contiennent l'information supplémentaire nécessaire pour résoudre le système d'équations.

1.2.1 Adéquation de la méthode inverse à une problématique particulière, exemple de la chenille

Cette méthode semble la plus prometteuse de toutes. Les limitations intrinsèques au système d'entraînement par chenille ne limitent pas l'IFRF. L'IFRF peut facilement identifier des sources de bruit qui ne sont pas dans un plan. Il s'agit simplement de placer l'antenne de microphones de façon appropriée. L'information obtenue sera la pression acoustique des sources de bruit. La façon dont la génération du bruit se fait ne sera pas détaillée. Certaines questions restent cependant à éclaircir. Comment réagira l'antenne si les sources génèrent toutes un signal aux mêmes fréquences? Le système comporte beaucoup de surfaces réfléchissantes, est-ce une limitation importante? Certaines sources sont dans des endroits exigus, l'IFRF pourra-t-elle les identifier clairement? Sera-t-on en mesure de bien prédire analytiquement les FRF entre les sources et les microphones? Sinon comment peut-on les mesurer? Les sources sont-elles des monopôles, des dipôles ou des quadripôles? Le chapitre 2 tentera de répondre à ces questions.

1.3 L'holographie acoustique

Comme mentionné au début de la section traitant de la méthode inverse, si les méthodes de pression acoustique ou d'intensimétrie ne peuvent être mises de l'avant il faut se tourner vers des méthodes de mesure différentes. Il existe des méthodes permettant de quantifier les sources de bruit sans changer le système mécanique. Parmi celles-ci, les plus connues sont l'holographie acoustique et la méthode inverse. Ces méthodes utilisent des vecteurs de microphones appelés antennes acoustiques pour la méthode inverse et plan de mesure pour l'holographie acoustique. Cette section traitera de l'holographie acoustique. Mentionnons également que la plupart de l'information de cette section vient des références suivantes : Maynard (1985 et 1987), Williams (1999),

Dumbacher et Brown (1999), Ruhala et Burroughs (1999), Ross (1999) et Tomlin (1999).

L'holographie acoustique est familièrement appelée NAH (Nearfield Acoustical Holography) ou STSF (Spatial Transformation of Sound Field). Cette technique consiste à mesurer le champ de pression acoustique dans un plan parallèle au plan des sources (figures 5 et 6). Par calcul il est alors possible de reconstituer le champ de pression acoustique en amont ou en aval du plan de mesure. Il est possible d'obtenir la contribution des sources en calculant le champ de pression très près des sources. Il est également possible de prédire le niveau sonore à n'importe quelle distance de la source. Cette technique de mesure permet également d'obtenir d'autres paramètres caractérisant les sources de bruit comme la vitesse surfacique, le comportement vibratoire et l'intensité acoustique.

Première hypothèse de NAH : la pression acoustique satisfait l'équation d'onde dans un milieu homogène linéaire. La pression à un point donné à l'extérieur du plan de mesure peut être obtenue en résolvant l'équation d'onde acoustique dans un champ libre, espace sans source et sans réflexion. Cette équation est connue comme la première intégrale de Rayleigh.

$$p(x, y, z) = \frac{-i\rho_0 c k}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{w}(x', y', z') \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dx' dy' \quad (1.3)$$

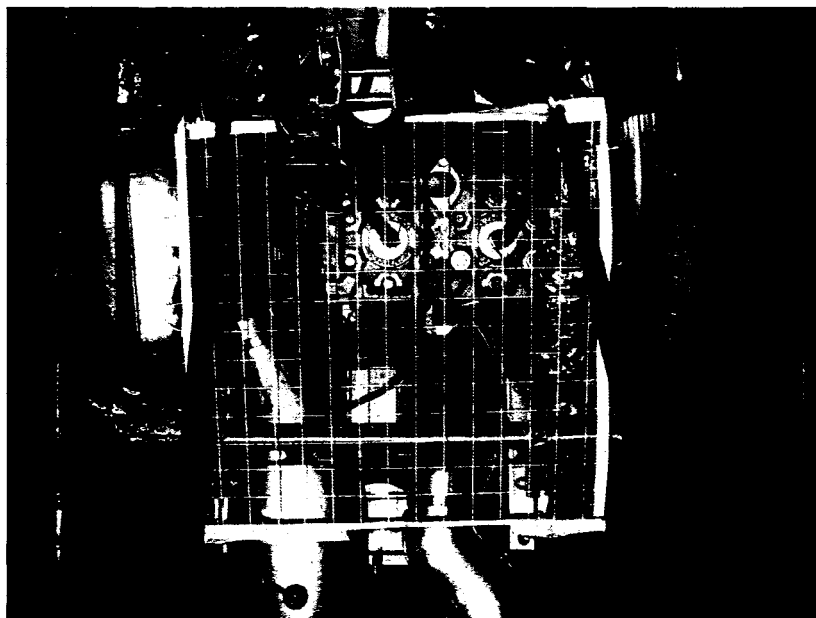


Figure 5 Plan de mesure d'holographie sur un ensemble moteur

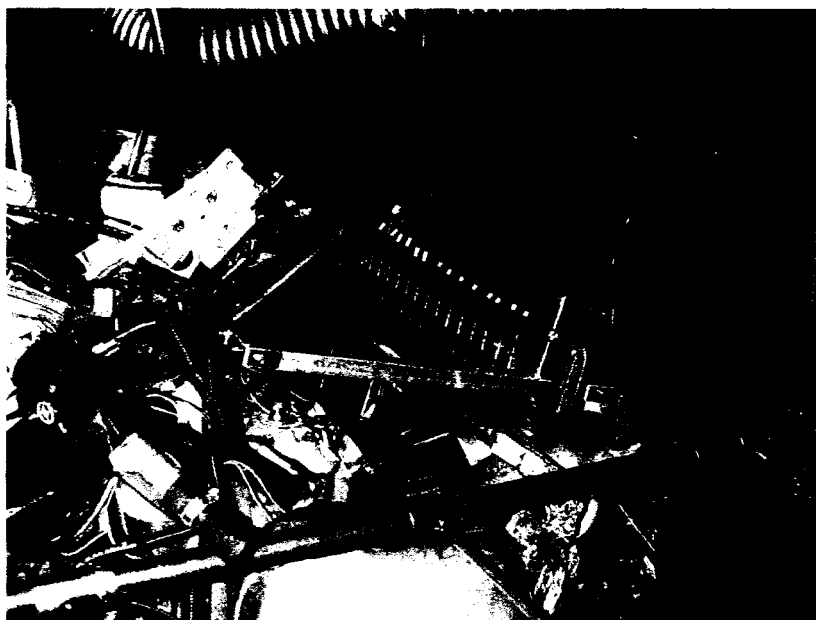


Figure 6 Des séquences durant les mesures d'holographie

Cette intégrale peut représenter la pression acoustique en tout point dans un champ libre sans source. Cette formulation est une intégrale de convolution en 2D. La NAH utilise la FFT 2D pour résoudre la convolution. La FFT 2D transforme le champ spatial de pression 2D, $P(x,y)$ pour un plan, dans le domaine des nombres d'onde $P(kx,ky)$. Pour faire cette FFT 2D, les données doivent être prises dans un plan avec un espacement régulier pour chaque direction, $dx = cste$, $dy = cste$ mais dx ne doit pas obligatoirement être égale à dy . Dans la transformée temps-fréquence, l'espacement temporel entre les échantillons doit être constant.

Le théorème de Shannon concernant l'échantillonnage définit la résolution ou l'espacement des points de mesure comme égale à 1 sur la fréquence d'échantillonnage. Ainsi, la fréquence maximale (f_{max}) présente doit être égale ou inférieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Ceci évite les problèmes de repliement spectral. Dans la transformée temps-fréquence, la relation est la suivante;

$$\Delta t = \frac{1}{f_{échan}} \leq \frac{1}{2f_{max}} \quad (1.4)$$

Pour la transformée spatiale-nombre d'onde, empêcher le repliement spatial signifie que l'espacement des micros doit être plus petit ou égal à la moitié de la longueur d'onde de la fréquence maximale présente.

$$\max(dx, dy) \leq \frac{c}{2f_{max}} = \frac{\lambda}{2} \quad (1.5)$$

Les écartements dépendent aussi de la dynamique (signal sur bruit) et de la distance entre le plan source et le plan de l'hologramme (Williams, 1999). Si un des microphones a beaucoup plus de signal que les autres, il faut modifier la distribution des microphones afin de mieux représenter cette zone. Cette situation peut se produire

lorsqu'une des sources est très directive ou très dominante. Le plan de mesure de l'hologramme doit être ajusté en fonction de ces situations.

La FFT assume que le signal mesuré doit être périodique ou entièrement compris dans l'échantillon de mesure. Dans la transformée temps-fréquence, une fenêtre temporelle est appliquée aux données pour réduire les effets de fuites. Pour la FFT 2D dans le domaine spatial - nombre d'onde, empêcher les fuites veut dire que les signaux de pression doivent être complètement observés spatialement par l'antenne de micros, ce qui signifie une pression acoustique nulle sur les bords de l'antenne. Alors une fenêtre 2D doit être appliquée afin de forcer une pression nulle sur les bords. Cependant, il faut prendre en compte qu'appliquer une fenêtre ajoute de la distorsion au système.

Pour calculer les coefficients de Fourier adéquatement, un certain nombre de points de mesure sont requis. Dans la transformée temps-fréquence, 4 échantillons de mesure signifie 4 lignes spectrales. Il faut que toutes les fréquences présentes dans le signal tombent dans ces 4 lignes spectrales. Dans la transformée spatiale-nombre d'onde, l'antenne doit avoir quelques micros dans chaque direction, typiquement de 12 à 16 (dépend de la dimension de l'hologramme et de la fréquence maximale retenue).

1.3.1 Ondes évanescentes

Les mesures de NAH sont faites en champ proche, moins d'une longueur d'onde, afin de capter l'information localisée des sources. Cette information contient des ondes évanescentes permettant à la NAH d'avoir une résolution de source plus petite que la longueur d'onde. Le nombre d'onde est obtenu comme suit :

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad (1.6)$$

Où k_x et k_y sont déterminés par les dimensions de l'antenne et sont les lignes spectrales dans le domaine des nombres d'onde. Les valeurs des nombres d'onde sont les coefficients de Fourier. On peut aussi écrire

$$k_z = \sqrt{k^2 - (k_x^2 + k_y^2)} \quad (1.7)$$

Où z est la distance entre la source et le plan de mesure. Quand k_z est réel, la fonction de propagation est un terme de phase pur, ce qui représente des ondes dont la phase varie en fonction de la distance. Quand k_z est imaginaire, la fonction de propagation décroît exponentiellement, ce qui représente des ondes dont l'amplitude varie en fonction de la distance. Ces ondes sont appelées ondes évanescentes, contenant les informations localisées de la source. Sans les ondes évanescentes, la résolution de la source est une demi-longueur d'onde. Les ondes évanescentes décroissent à une valeur minimale à une longueur d'onde de la source. C'est la raison pour laquelle le plan de mesure doit être le plus près possible de la source.

1.3.2 Mesure en plusieurs séries

Pour la prise de mesure, si la source est en régime stable, il est possible de faire l'acquisition des données en plusieurs séries de mesure à l'aide d'une antenne plus petite (figure 6). Les séries de mesure doivent être liées par un élément de phase à l'aide de micros de référence. Il est alors possible de retrouver une cohérence entre tous les points de mesures, souvent en utilisant la SVD. Il doit y avoir au moins autant de références que de sources incohérentes. Les micros doivent alors être placés de façon à détecter la contribution de chaque source, soit près des sources mêmes.

1.3.3 Filtre dans le domaine des nombres d'onde

Le bruit spatial non corrélé avec les données spatiales devient un bruit de fond uniforme dans le domaine des nombres d'onde. Ce bruit peut être causé par les variations dans la position des micros, calibration, erreur de phase, erreurs statistiques, etc. Lors de la rétropropagation vers la source, la pression acoustique dans le domaine des nombres d'onde, qui est en dehors du cercle ($k^2 = k_x^2 + k_y^2$), est amplifiée exponentiellement. Les plus grands nombres d'onde sont plus amplifiés. Quand le bruit est du même ordre de grandeur que les données dans les grands nombres d'onde, les effets de ce bruit deviennent plus importants. Appliquer un filtre passe-bas réduit cet effet. Le filtre, en enlevant le bruit à hautes fréquences, diminue également le signal. La fréquence de coupure du filtre doit être choisie avec soin afin de garder les données qui nous intéressent. Lors du calcul d'un champ de pression à partir de l'hologramme en s'éloignant de la source (rayonnement direct), ce problème n'apparaît plus car les ondes évanescences décroissent rapidement.

1.3.4 Procédure de mesure

Willams (1999) et Dumbacher (1999) proposent la procédure suivante pour effectuer des mesures de NAH :

Pour les mesures en séries, prendre les auto spectres et inter spectres entre les micros de référence et les micros de l'antenne. Si les données sont prises en une seule série, mesurer le signal temporel de pression.

Pour les mesures en séries, décomposer le signal en champ de pression partielle (liée à chaque micro de référence) à l'aide de technique de cohérence virtuelle (SVD) ou partielle. Les étapes 3 à 7 sont alors exécutées pour chaque champ de pression partielle.

Pour les mesures en une seule série, transformer le signal temporel de pression dans le domaine fréquentiel.

$$F_x F_y [p(x, y, z)] \equiv P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y) e^{ik_z z} \quad (1.8)$$

Appliquer le fenêtrage spatial en 2D pour obtenir une pression nulle sur les bords du plan de mesure. Prendre la FFT 2D du champ de pression, amenant les données dans le domaine des nombres d'onde.

Appliquer un filtre passe-bas dans le domaine des nombres d'onde si on calcule la rétropropagation vers la source. Multiplier les données dans le domaine des nombres d'onde par le facteur de propagation dans le domaine des nombres d'onde.

$$\dot{W}(k_x, k_y, z) = \frac{k_z}{\rho_0 c k} e^{ik_z(z-z_h)} P(k_x, k_y, z_h) = G(k_x, k_y, z - z_h) P(k_x, k_y, z_h) \quad (1.9)$$

où

$$G(k_x, k_y, z - z_h) = \frac{k_z}{\rho_0 c k} e^{ik_z(z-z_h)} \quad (1.10)$$

Faire une FFT 2D inverse sur les résultats afin d'obtenir le champ de pression ou la vitesse dans le plan reconstruit.

$$\dot{w}(x, y, z_s) = F_x^{-1} F_y^{-1} [F_x F_y [p(x, y, z_h)] G(k_x, k_y, z_s - z_h)] \quad (1.11)$$

L'intensité est calculée à partir de la pression et de la vitesse reconstruite. Pour les mesures en séries faites à l'aide de plusieurs micros de référence, combiner les données pour chaque champ de pression partielle à l'aide de somme des moindres carrées.

1.3.5 Antenne de microphones

Si les conditions d'opérations sont transitoires, alors toutes les données doivent être prises en même temps. Si elles sont stables, il est alors possible de faire plusieurs séries de mesure. Les paramètres physiques de l'antenne sont interreliés et il est parfois nécessaire de faire plusieurs itérations avant d'obtenir la configuration optimale. La fréquence maximale d'intérêt ainsi que la résolution de la surface de la source déterminent l'espacement des micros. Le nombre de sources non cohérentes détermine le nombre de micros de référence. Il est souvent préférable d'ajouter une référence de plus. Pour éviter la fuite spatiale, c'est-à-dire un niveau de pression acoustique nul sur les bords de l'antenne et éviter de perdre de l'énergie en utilisant un fenêtrage spatial, il faut que l'antenne soit 1,5 à 2 fois plus grande que la source. On doit cependant appliquer une fenêtre spatiale à l'antenne pour forcer une pression nulle sur les bords. L'espacement des micros doit être égal ou inférieur à la moitié de la longueur d'onde de la fréquence maximale. Il est ainsi possible d'éviter le repliement spatial. L'antenne doit être placée à une distance de la source équivalente à 1 ou 2 fois l'espacement des micros. La fréquence la plus basse est liée à la dimension totale de l'antenne. Toute l'énergie contenue dans les fréquences plus petite que la demi-longueur d'onde de la dimension de l'antenne va être associée à la raie spectrale DC (0 Hz). Si les mesures sont prises sur un sol réfléchissant, l'antenne doit être à une hauteur correspondant à une demi fois l'espacement des microphones.

1.3.6 Mesures

Afin de s'assurer d'avoir des données fiables, il faut respecter certains points. Il est important de bien calibrer les micros avant les mesures. Il vaut toujours mieux acquérir les données en bandes fines, quitte à les convertir en tiers d'octave par la suite. Il vaut mieux utiliser un filtre analogique pour la pondération A. Il faut utiliser un filtre anti-

repliement analogue. Il faut fenêtrer temporellement les données. Il est également préférable de prendre plusieurs données afin de moyenner les résultats.

1.3.7 Adéquation de la NAH à une problématique particulière, exemple de la chenille

La limitation la plus évidente de cette méthode est la forme géométrique des sources de bruit. Ces sources sont disposées dans plusieurs plans, ce qui rend l'utilisation de la NAH impossible. Par exemple, avec la NAH, il serait impossible de savoir quel barbotin génère plus de bruit (pour visualisation des éléments de la chenille, voir figure 23, dans la section 3.2.1). L'information que donnerait la NAH se limiterait à identifier, localement, les parties qui génèrent du bruit. Il serait possible de discriminer la génération du bruit d'impact entre la dent de traction de la chenille, le sol et la lisse de suspension, un peu comme le font les manufacturiers de pneu dans leurs études (Ruhala et Burroughs, 1999).

1.4 La cohérence partielle

La cohérence partielle est une technique de traitement de signal permettant de distinguer la contribution des différentes sources dans un signal global. Dans les cas de sources multiples, les fonctions de cohérences partielles, contrairement aux fonctions de cohérence ordinaire, donne un indicateur quantitatif du degré de dépendance linéaire entre la source et le receveur (Bendat et Piersol, 1966). Cela est dû au fait que le calcul de la cohérence partielle permet d'éliminer l'effet des variables externes. Voici comment Bendat et Piersol (2000) décrit le processus.

Soit le système composé de 2 sources, $x_1(t)$ et $x_2(t)$, et de bruit, $n(t)$, de la figure 7. Les entrées $x_1(t)$, $x_2(t)$ et $n(t)$ étant non corrélées, l'autospectre de la sortie $G_{yy}(f)$ est la somme des 3 autospectres sans terme croisé. Soit :

$$G_{yy}(f) = G_{v_1 v_1}(f) + G_{v_2 v_2}(f) + G_{nn}(f) \quad (1.12)$$

où

$$G_{v_1 v_1}(f) = |L_{1y}(f)|^2 G_{11}(f) \quad (1.13)$$

$$G_{v_2 v_2}(f) = |L_{2y}(f)|^2 G_{22}(f) \quad (1.14)$$

$$G_{nn}(f) = G_{yy-1,2}(f) \quad (1.15)$$

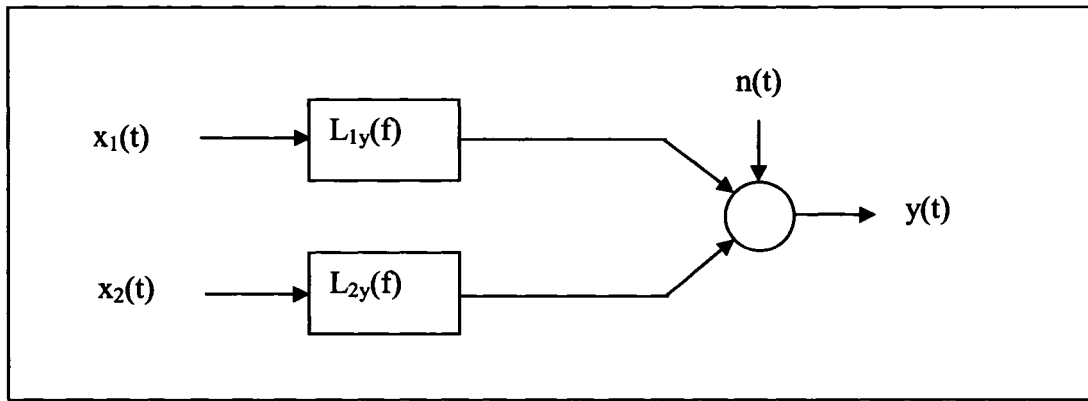


Figure 7 Définition d'un système composé de 2 sources

La notion $G_{yy-1,2}(f)$ indique la portion de l'autospectre de $y(t)$ qui n'est pas causée par ni $x_1(t)$, ni par $x_2(t)$. Le premier terme de l'autospectre

$$G_{v_1 v_1}(f) = \frac{|G_{1y}(f)|^2}{|G_{11}(f)|} G_{11}(f) = \gamma_{1y}^2(f) G_{yy}(f) \quad (1.16)$$

est le spectre de la cohérence de sortie associée à un modèle simple entrée/simple sortie avec $x_1(t)$ comme entrée et $y(t)$ comme sortie. Ici

$$\gamma_{1y}^2(f) = \frac{|G_{1y}(f)|^2}{G_{11}(f)G_{yy}(f)} \quad (1.17)$$

est la fonction de cohérence entre $x_1(t)$ et $y(t)$. Le deuxième terme de l'autospectre

$$G_{v_2v_2}(f) = \left| \frac{G_{2y1}(f)}{G_{221}(f)} \right|^2 G_{221}(f) = \gamma_{2y1}^2(f) G_{yy1}(f) \quad (1.18)$$

où

$$\gamma_{2y1}^2(f) = \frac{|G_{2y1}(f)|^2}{G_{221}(f)G_{yy1}(f)} \quad (1.19)$$

est, par définition, la fonction de cohérence entre $x_{2.1}(t)$ et $yy.1(t)$. Il s'en suit que $G_{v_2v_2}(f)$ est le spectre de la cohérence partielle de sortie associée à un modèle simple entrée/simple sortie avec $x_{2.1}(t)$ comme entrée et $yy.1(t)$ comme sortie. Le bruit non corrélé, noté $yy.1,2(t)$, est le même que $n(t)$.

Sous cet angle, il est évident que les fonctions de cohérence partielle jouent le même rôle que les fonctions de cohérence ordinaire à l'exception qu'elles s'appliquent à des signaux conditionnés au lieu de signaux bruts. Comme la cohérence ordinaire, la cohérence partielle est toujours comprise entre 0 et 1.

Un système à 2 entrées et à une sortie, comme à la figure 7, avec des entrées non corrélées est l'équivalent de 2 systèmes simple entrée/simple sortie. L'équation pour le spectre de sortie du bruit est

$$G_{yy1,2}(f) = G_{yy1}(f) - |L_{2y}(f)|^2 G_{221}(f) = [1 - \gamma_{1y}^2(f)] G_{yy1}(f) \quad (1.20)$$

Après substitution

$$G_{yy,1,2}(f) = [1 - \gamma_{1y}^2(f)][1 - \gamma_{2y,1}^2(f)]G_{yy,1}(f) \quad (1.21)$$

La fonction de cohérence multiple $\gamma_{yx}^2(f)$ pour 2 entrées corrélées est

$$\gamma_{yx}^2(f) = 1 - [1 - \gamma_{1y}^2(f)][1 - \gamma_{2y,1}^2(f)] \quad (1.22)$$

Avec ces équations, il est possible de distinguer l'énergie provenant de chacune des sources. Il est même possible d'éliminer le bruit de fond, si ce bruit n'est pas corrélé avec le système.

1.4.1 Adéquation de la cohérence partielle à une problématique particulière, exemple de la chenille

Cette approche fonctionne bien si les sources ne sont pas corrélées entre elles. Pour notre problématique, les signaux proviennent de sources impulsionnelles, répétitives et synchronisées. Le rayonnement acoustique de ce genre de source est composé d'ondes sinusoïdales décroissantes. Comme le mécanisme générant les impacts (la chenille) est le même pour toutes les sources, elles sont liées ensembles. À cause de ces 2 points, notre problématique ne se prête pas à l'utilisation de la cohérence partielle comme outils de reconnaissance des sources de bruit.

1.5 Détection de défaut dans les machines tournantes

Les méthodes de détection de défaut dans les machines tournantes servent en grande partie à détecter les défauts dans les roulements à billes. Ces méthodes ont été

développées afin d'effectuer de la maintenance préventive, bien avant que la machine ait un bris. Thomas (2003) présente un résumé de des principales méthodes de détection de défaut ainsi que leurs caractéristiques.

La plupart de ces méthodes sont basées sur des outils mathématiques qui calculent différents indices à partir de signaux temporels de vibrations. Ces indices, lorsqu'ils atteignent un certain niveau, permettent de conclure à la présence d'un défaut. Certaines méthodes (Thomas, 2003), comme l'analyse de Cepstrum ou la détection d'enveloppe, peuvent même identifier le défaut.

Ces méthodes, pour fonctionner, comparent les niveaux de leurs indices avec ceux obtenus lorsque la machine fonctionne sans défaut. En fait, ces méthodes suivent l'évolution du signal temporel et concluent à la présence d'un défaut lorsque leurs indices dépassent un certain niveau.

1.5.1 Adéquation des méthodes de détection de défaut dans les machines tournantes à une problématique particulière, exemple de la chenille

Les méthodes de détection de défaut dans les machines ont été développées dans l'optique de détecter une variation dans un signal et non pas pour détecter un signal de référence dans un signal global. Elles ne peuvent donc pas servir à identifier une source d'impact parmi d'autres sources d'impact.

1.6 Conclusions de la revue de la littérature

Le tableau I présente un résumé des méthodes classiques d'identifications des sources de bruit. La pression acoustique ou l'intensimétrie ne peuvent être utilisées adéquatement pour identifier les sources de bruit dans un système d'entraînement par chenille. Les limitations spécifiques à ce type de système mécanique sont, en

particulier, le nombre de sources probables, leurs similitudes fréquentielles et l'impossibilité de faire du camouflage sans altérer le fonctionnement du système. Ces deux méthodes d'identification de sources de bruit ne sont pas adéquates.

La limitation la plus évidente de la NAH est la forme géométrique et l'emplacement des sources de bruit de notre problématique. Ces sources sont disposées dans plusieurs plans, ce qui rend l'utilisation de la NAH impossible. Donc, cette méthode d'identification des sources de bruit ne convient pas à notre problématique.

La cohérence partielle fonctionne bien si les sources ne sont pas corrélées entre elles. Pour notre problématique, les signaux proviennent de sources impulsionnelles, répétitives et synchronisées. Comme le mécanisme générant les impacts (la chenille) est le même pour toutes les sources, elles sont liées ensembles et ont donc une cohérence non nulle. À cause de cette cohérence, notre problématique ne se prête pas à l'utilisation de la cohérence partielle comme outils de reconnaissance des sources de bruit.

Les méthodes de détection de défaut dans les machines, ayant été développées dans l'optique de détecter une variation dans un signal et non pas pour détecter un signal de référence dans un signal global, ne peuvent donc pas servir à identifier une source d'impact parmi d'autres sources d'impact.

L'IFRF semble la méthode la plus prometteuse de toutes. Les limitations intrinsèques au système d'entraînement par chenille ne limitent pas l'IFRF. L'IFRF peut facilement identifier des sources de bruit qui ne sont pas dans un plan. Il s'agit simplement de placer l'antenne de microphones de façon appropriée. Certaines questions restent cependant à éclaircir. Le chapitre 2 tentera de répondre à ces questions.

Tableau I

Méthodes classiques d'identifications des sources de bruit

	Pression	Intensimétrie	Cohérence partielle
Reconstruction surface	Pas de reconstruction	Pas de reconstruction	Pas de reconstruction
Nombre de sources	1	1	1
Forme de l'antenne	Pas d'antenne	Pas d'antenne	Pas d'antenne
Nombre de microphone	Peu	2 à 6	Peu
Temps de calcul	Rapide	Rapide	Rapide
Temps de montage	Long (encoffrement)	Rapide	Rapide
Temps de mesure	Rapide	Moyen à long (selon le montage)	Rapide
Valeur obtenue	Pression ou intensité par calcul	Intensité	Pression ou intensité par calcul
Autres contraintes	Précision fonction du rapport signal sur bruit, environnement anéchoïque	L'environnement doit être favorable	Source doivent être non corrélées, environnement anéchoïque
Limitation en fréquence	Voir les différentes normes	Espacement entre les microphones	Voir les différentes normes

Tableau I (suite)

Méthodes classiques d'identifications des sources de bruit

	IFRF	NAH	Détection de défaut
Reconstruction surface	Aucune limitation	2-D	Pas de reconstruction
Nombre de sources	Aucune limitation	Aucune limitation	1
Forme de l'antenne	Aucune limitation	2-D	Pas d'antenne
Nombre de microphone	Nombre de source + Δ	Beaucoup	Accéléromètres
Temps de calcul	Long (n^3)	Moyen (n^2)	Rapide
Temps de montage	Rapide	Long	Rapide
Temps de mesure	Rapide	Long à rapide	Rapide
Valeur obtenue	Pression acoustique	Pression, vitesse surfacique, intensité	Indice de défaut
Autres contraintes		Pression nulle sur les bords de l'antenne	Besoin de connaître l'historique vibratoire
Limitation en fréquence	Aucune	Dimension de l'antenne	Aucune

CHAPITRE 2

VALIDATION DE L'IFRF À L'AIDE DE SOURCES MONOPOLAIRES

De la revue de la littérature, il en ressort que l'IFRF demeure une avenue possible permettant d'identifier les sources de bruit dans un système d'entraînement par chenille. Cette section tentera de valider l'IFRF comme méthode de reconnaissance dans de telles conditions. Pour ce faire, des sources monopolaires ont été simulées de façon à représenter un tel système. Rappelons les équations essentielles à l'IFRF, pour un champ libre, telles que décrites au chapitre 1 :

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (2.1)$$

où

$\{X(\omega)\}$ est la FFT du vecteur microphone contenant les valeurs de pression acoustique;

$[H(\omega)]$ est la matrice des FRF entre les sources et les microphones;

$\{F(\omega)\}$ est la FFT vecteur de contribution des sources.

En résolvant pour les sources :

$$\{F(\omega)\} = [H(\omega)]^+ \{X(\omega)\} \quad (2.2)$$

Où $[H(\omega)]^+$ est la pseudo inverse de la matrice des FRF.

Donc, pour les différentes sources monopolaires, les fonctions de réponse en fréquence H sont :

$$H_{kl} = \frac{1}{d_{kl}} \exp\left(-j\omega \frac{d_{kl}}{c}\right) \quad (2.3)$$

où H_{kl} = FRF entre source k et microphone l,
 d_{kl} = distance entre source k et microphone l.

Pour les valeurs de pression acoustique aux microphones :

$$P_l = \sum_1^k \left(\frac{A_k}{d_{kl}} \exp\left(-j\omega \frac{d_{kl}}{c}\right) \right) \quad (2.4)$$

où P_l = pression acoustique au microphone l,
 A_k = amplitude complexe de la source k.

Lors des simulations numériques, l'erreur d'amplitude, en dB, a été calculée comme suit :

$$erreur_k = 20 \bullet \log_{10} \left(\frac{abs(A_{k \text{ calculée}})}{A_k} \right) \quad (2.5)$$

où $erreur_k$ = erreur lors du calcul de l'amplitude de la source k,
 $A_{k \text{ calculée}}$ = amplitude calculée de la source k.

Pour les simulations, 4 sources et 6 microphones ont été utilisés. Le nombre de sources a été arrêté à 4 afin de représenter un système suffisamment complexe mais pas au point d'alourdir le développement de la méthode. Le nombre de microphones utilisés est fonction du nombre de sources à identifier. Dans le cas présent, comme il y a 4 sources, il faut au minimum 4 microphones mais 1 ou 2 supplémentaires ne peuvent qu'aider à l'identification des sources. À moins de mention contraire, les 4 sources génèrent un

signal sinusoïdal à 350 Hz. Les caractéristiques des sources sont définies au tableau II. Les sources dites non modélisées, source 5 et 6, utilisées pour l'analyse ultérieure de bruit de fond, sont également définies dans ce tableau. La localisation des microphones est définie au tableau III. La figure 8 montre une représentation géométrique de l'emplacement des sources et des microphones.

Le modèle analytique a servi à modéliser les effets lors de la variation des paramètres suivants :

- 1- Erreur sur l'emplacement des microphones ou des sources,
- 2- Sources non modélisées.

Mais, dans un premier temps, il est possible, à partir des équations et de la définition de la méthode, de faire certaines analyses préliminaires.

Tableau II

Caractéristiques des sources de bruit pour le modèle analytique

	Modélisées				Non modélisées	
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6
Fréquence (Hz)	350	350	350	350	350	350
Amplitude (V)	1	2	1,5	0,75	Variable	Variable
Localisation (m)						
X	0,17	0,40	0,50	1,00	0,20	0,30
Y	0,33	0,40	0,00	0,10	0,40	0,10
Z	0,40	0,20	0,27	0,10	0,30	0,70

Tableau III

Localisation des microphones utilisés dans le modèle analytique

Localisation (m)	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6
X	0,17	0,10	0,55	1,00	1,40	0,75
Y	0,33	0,40	0,05	0,07	0,15	0,40
Z	0,50	0,50	0,45	0,50	0,35	0,50

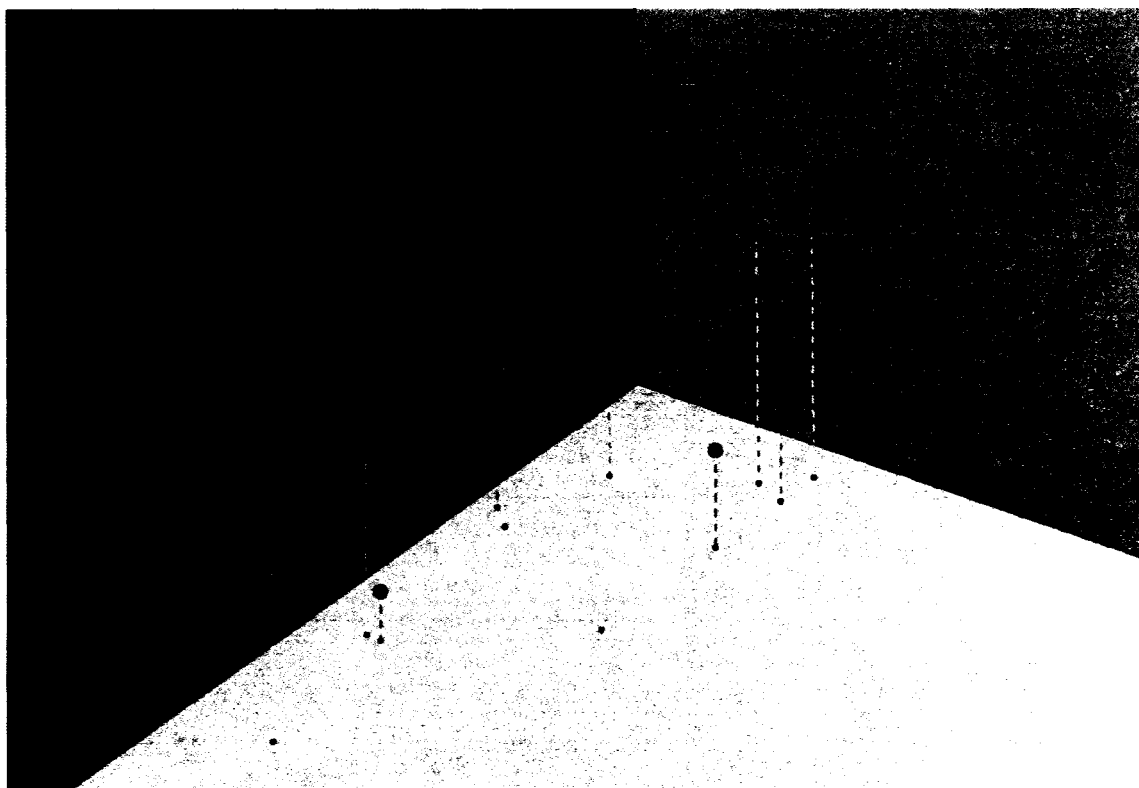


Figure 8 Représentation géométrique des sources (en bleu), des source variables (en vert) et microphones (carrés noirs). Les plans en gris sont là pour représenter les plans XY, YZ et ZX.

2.1 Analyses préliminaires

L'IFRF exécute les calculs fréquence par fréquence, signifiant que la fréquence émise par les différentes sources ne peut être une source d'erreur. Donc, pour un modèle analytique, faire varier le contenu fréquentiel des différentes sources n'influencera pas la reconnaissance d'une source référence. Par contre, en appliquant cette méthode avec des signaux réels, il est possible d'avoir certaines erreurs. En effet, il n'est pas rare de voir varier légèrement le contenu fréquentiel d'une source lorsque celle-ci est sollicitée par des impacts. Par exemple, si lors d'un impact, le contenu fréquentiel du rayonnement acoustique est différent de celui utilisé pour la construction de la matrice des FRFs ($H(\omega)$), alors le calcul de la contribution de cette source sera erroné. Pour

contourner cet inconvénient, il faut construire la matrice de FRFs en utilisant des signaux larges bandes.

La phase du signal est une information importante dans le calcul de l'IFRF, comme vu à l'équation 2.4 où le terme A_k (qui est complexe) contient l'information de phase. En fait, une variation de phase aurait les mêmes conséquences qu'une variation de distance entre la source et le microphone. Pour un modèle analytique, il n'y a pas de variation de phase pour les sources mais dans le cas de sources réelles, il est possible d'en avoir. Comme mentionné précédemment, lorsque les sources sont excitées par des impacts, il n'est pas rare de voir des changements du contenu fréquentiel mais également des variations sur la phase relative dans le contenu fréquentiel.

Le rapport signal sur bruit est difficile à évaluer avec un modèle analytique. En effet, avec un modèle analytique où le contenu fréquentiel est constant en fréquence et en phase, peu importe l'amplitude relative entre les différentes sources, il sera toujours possible de les caractériser. Pour des signaux réels, des variations (en fréquence et en phase) sont présentes dans le contenu fréquentiel. Ces variations sont aléatoires et dépendent fortement du mode d'excitation. En général, pour de signaux réels, un rapport bruit sur signal supérieur à 10 dB signifie que la source recherchée sera difficile à caractériser adéquatement. Cette méthode de reconnaissance devrait avoir la même sensibilité.

2.2 Erreur sur l'emplacement des microphones

Il faut noter ici qu'une erreur sur l'emplacement des microphones aura les mêmes répercussions qu'une erreur sur l'emplacement des sources. Les figures 9 à 11 montrent l'effet d'une erreur sur l'emplacement des microphones. L'erreur d'emplacement est la différence entre la position réelle du microphone et la position qui a servi à calculer les

FRF. Sur ces courbes, les variations de position sont exprimées en % de la longueur d'onde afin de bien montrer l'effet de la fréquence.

La figure 9 montre l'effet de la variation de l'emplacement d'un microphone. L'erreur est plus grande lorsque les variations d'emplacement sont négatives. En fait, lorsque les variations sont positives, c'est que la position du microphone s'éloigne des sources et, à l'opposé, le microphone s'approche des sources pour une variation négative. Lorsque le microphone s'éloigne des sources, son signal diminue d'amplitude et sa contribution à la résolution du système est de moindre importance. Lorsque le microphone s'approche des sources, son signal augmente et sa contribution à la résolution du système augmente également. Donc une erreur qui rapproche le microphone a plus d'importance qu'une erreur qui l'éloigne.

À la figure 10, variations de l'emplacement de 2 microphones, l'erreur sur l'amplitude des sources est similaire à celle de la figure 9. Lorsque plus de microphones ont des variations de positionnement, l'erreur dans l'estimé de l'amplitude des sources augmente. À l'extrême, lorsque tous les microphones varient de positions (figure 11), il est impossible de déterminer l'amplitude des sources.

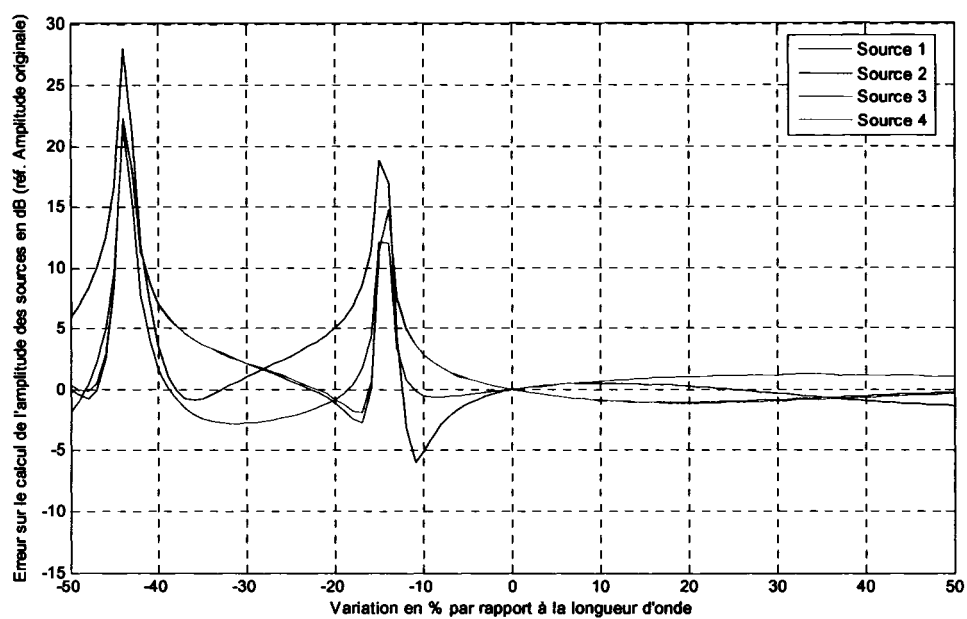


Figure 9 Variation sur l'emplacement d'un microphone

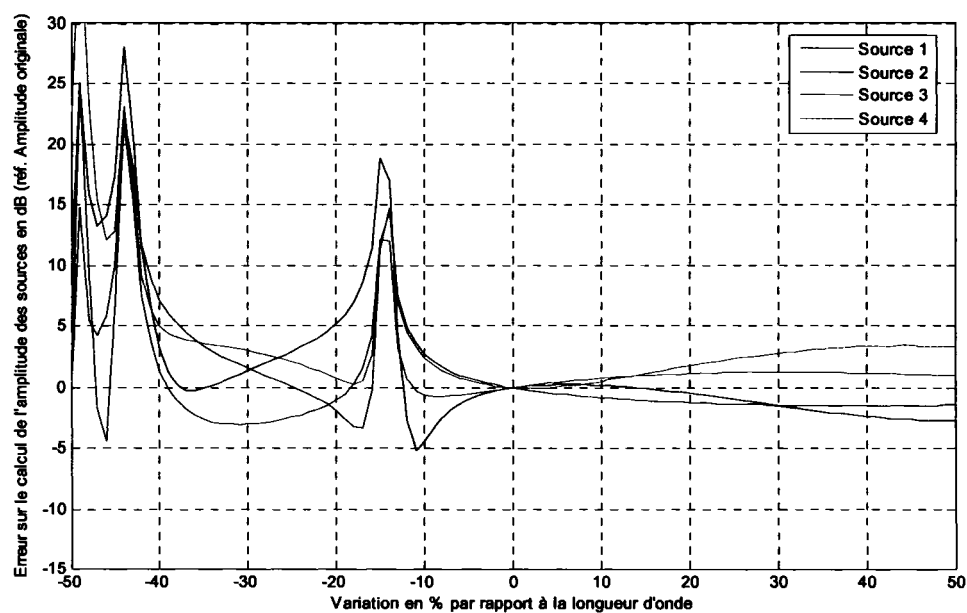


Figure 10 Variation sur l'emplacement de 2 microphones

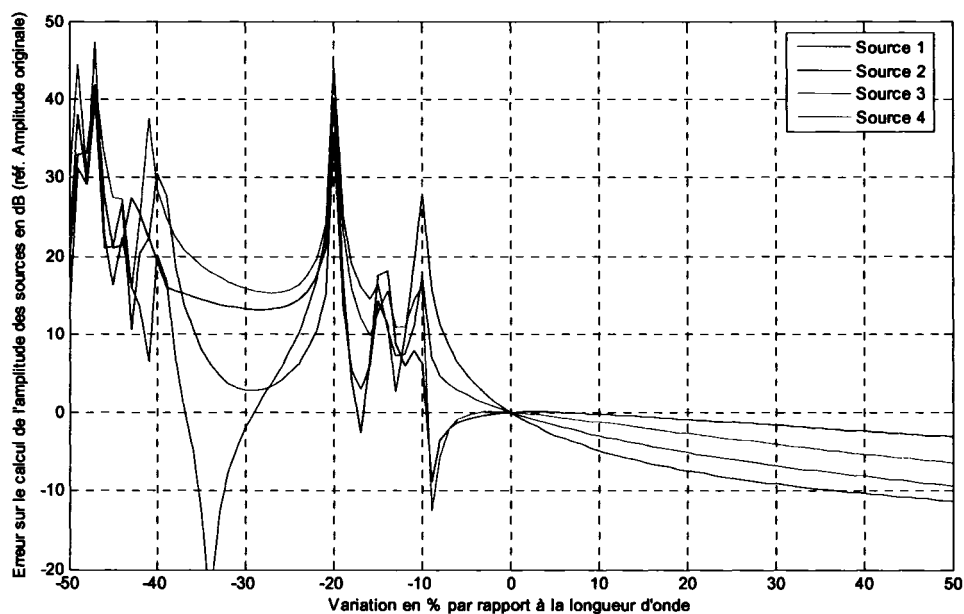


Figure 11 Variation sur l'emplacement des 6 microphones

Lorsque la fréquence du signal est plus basse, ce type d'erreur est plus prononcé (figures 12 à 14). Ce phénomène s'explique par la façon dont les variations de position des microphones sont simulées : la variation est un pourcentage de la longueur d'onde. Pour une basse fréquence, un faible pourcentage de variation aura la même variation de distance qu'un fort pourcentage d'une haute fréquence. Pour une fréquence plus élevée (figures 15 à 17), l'erreur sur l'amplitude calculée est moindre. Cela est dû en partie à cause de la faible longueur d'onde en regard de la dimension de l'antenne.

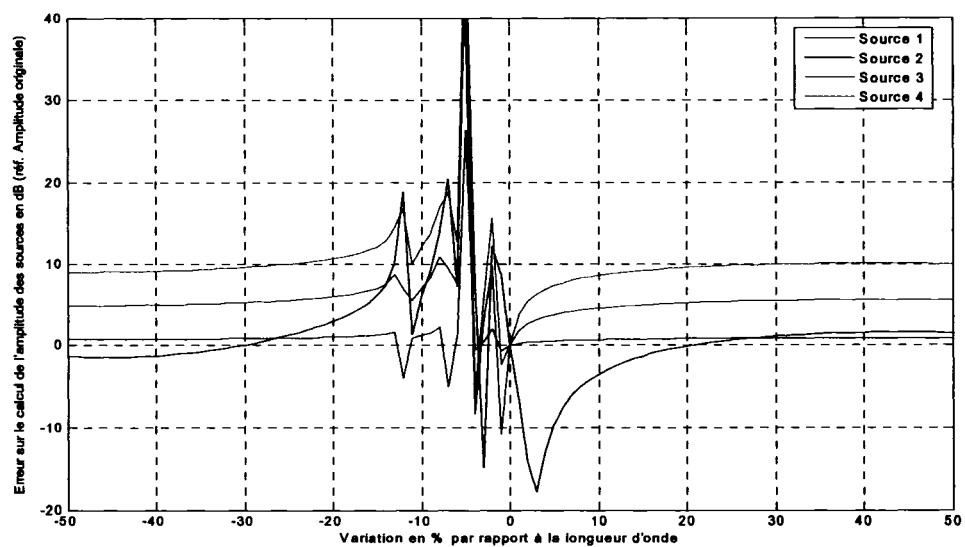


Figure 12 Variation de l'emplacement de 1 microphone, fréquence de source à 40Hz

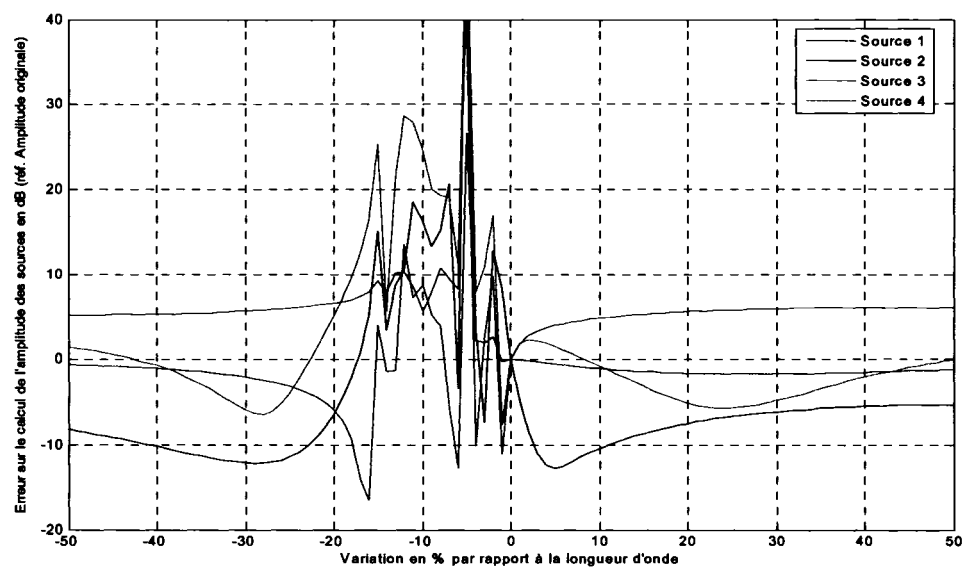


Figure 13 Variation de l'emplacement de 2 microphones, fréquence de source à 40Hz

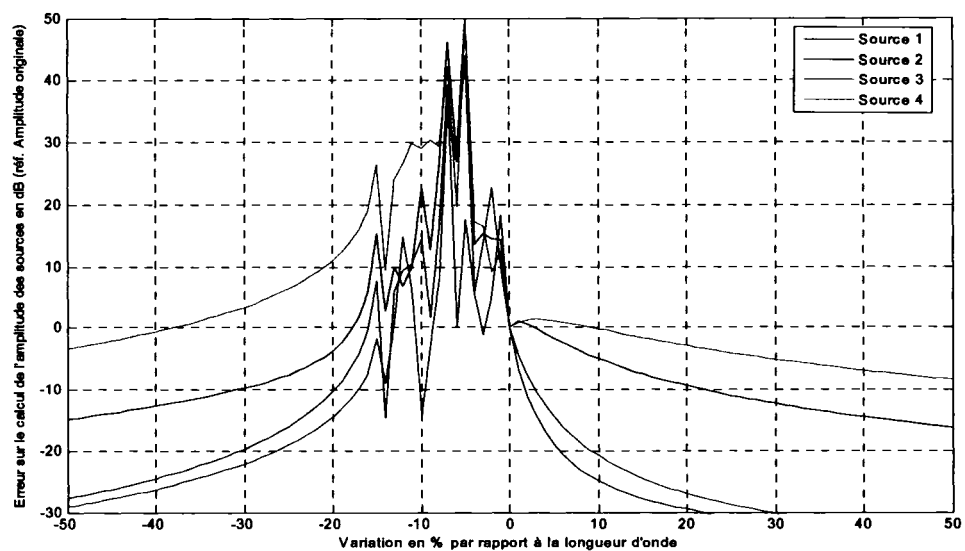


Figure 14 Variation de l'emplacement des 6 microphones, fréquence de source à 40Hz

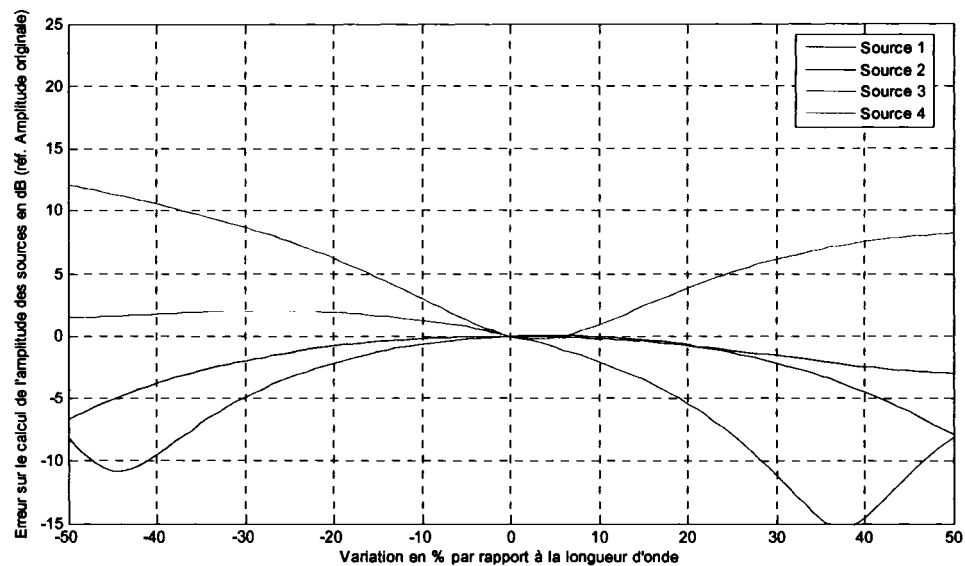


Figure 15 Variation de l'emplacement de 1 microphone, fréquence de source à 4000Hz

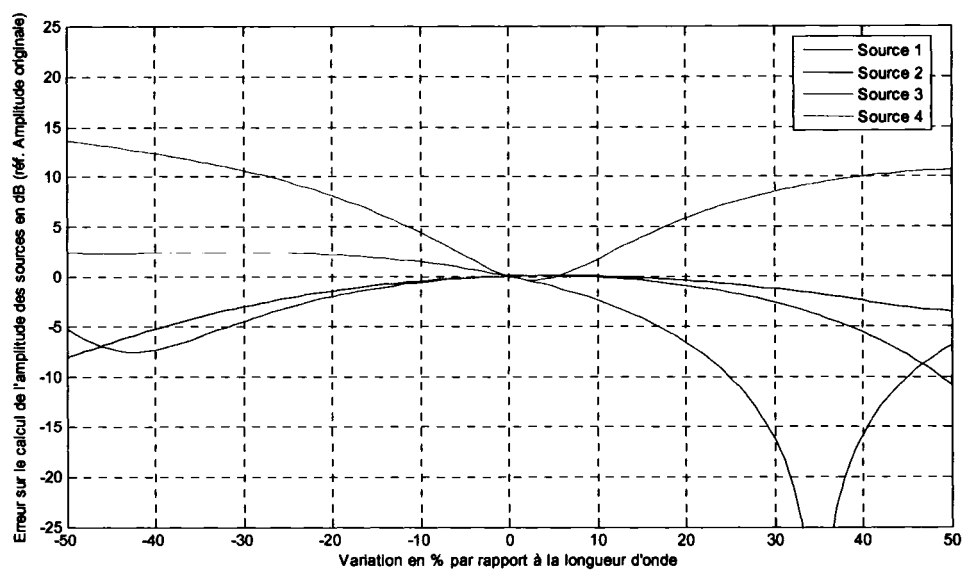


Figure 16 Variation de l'emplacement de 2 microphones, fréquence de source à 4000Hz

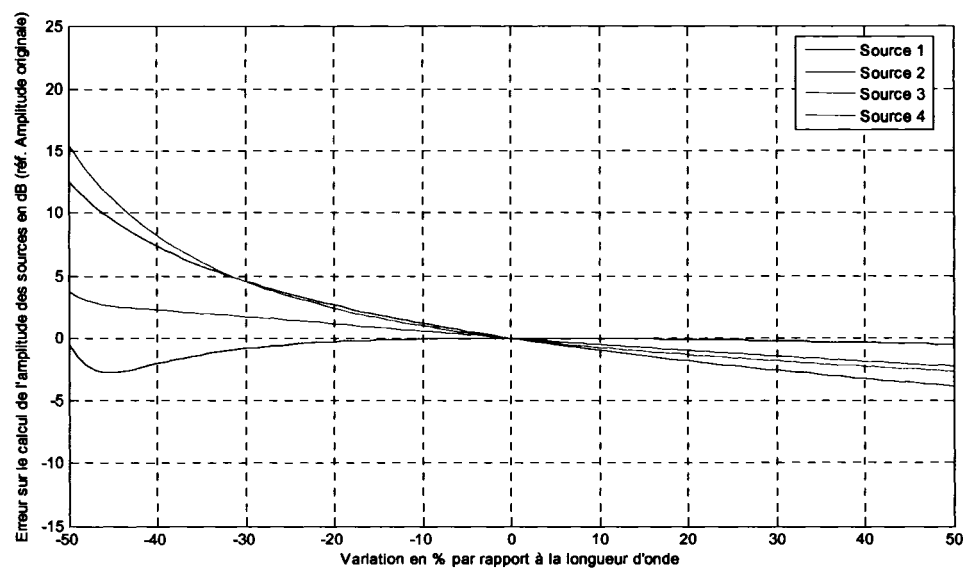


Figure 17 Variation de l'emplacement des 6 microphones, fréquence de source à 4000Hz

2.3 Sources non modélisées

La présence de sources parasites a beaucoup d'influence sur le calcul des amplitudes des sources modélisées. Les sources parasites peuvent être des sources non modélisées ou du bruit de fond. Les figures 18 à 20 montrent cette influence. S'il y a une seule source non modélisée (figure 18), son influence est quand même notable. L'influence qu'elle aura dépend de son emplacement et de son amplitude. Elle aura plus d'influence sur les faibles sources ou sur les sources plus près (figure 19). Plus il y a de sources, plus les erreurs de calcul d'amplitude seront importantes (figure 20), surtout à cause du rapport signal sur bruit. Pour un signal en basse fréquence (figure 21) ou en haute fréquence (figure 22), les erreurs sur le calcul des amplitudes sont dans le même ordre de grandeur.

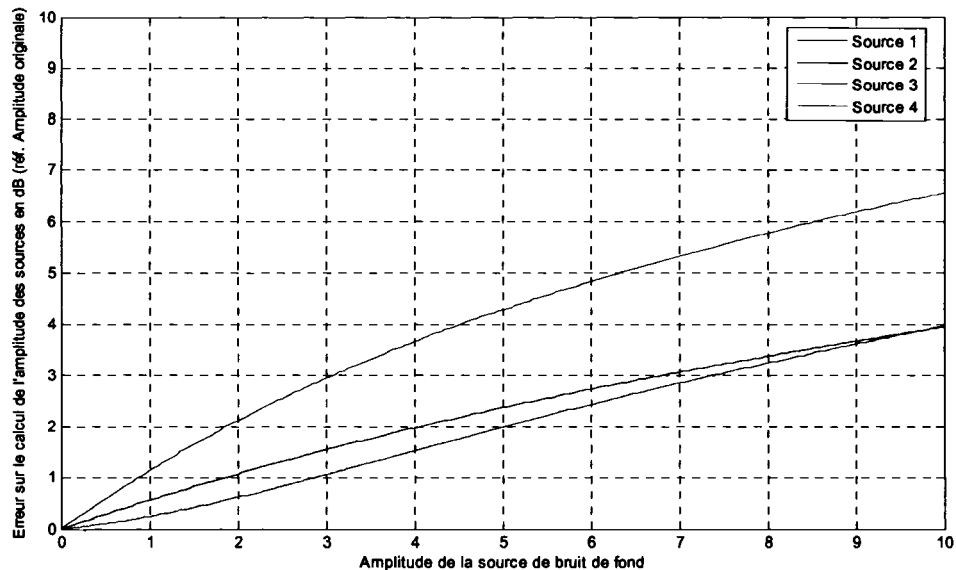


Figure 18 Ajout de une source de bruit non modélisée, similaire à du bruit de fond

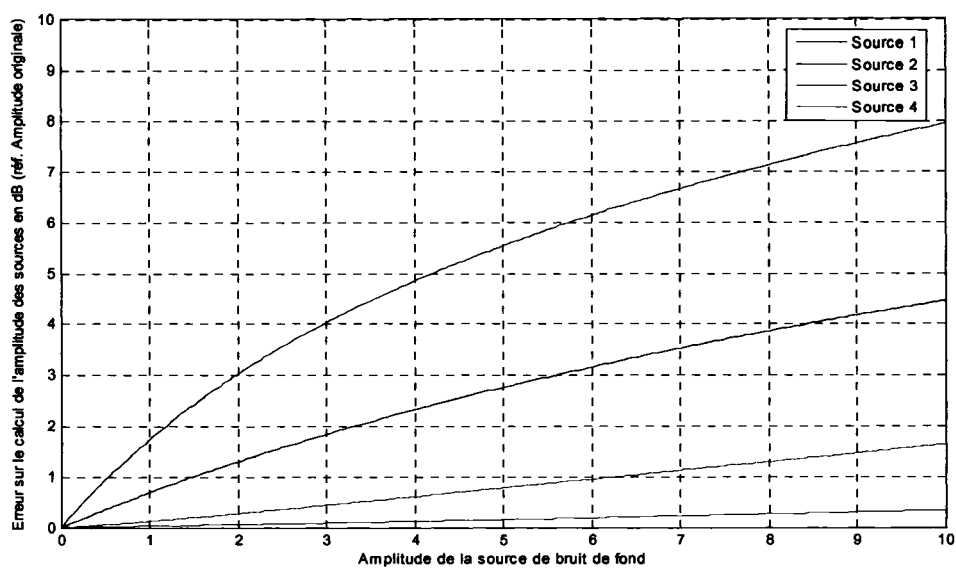


Figure 19 Ajout de une source de bruit non modélisée près de la source 1, similaire à du bruit de fond

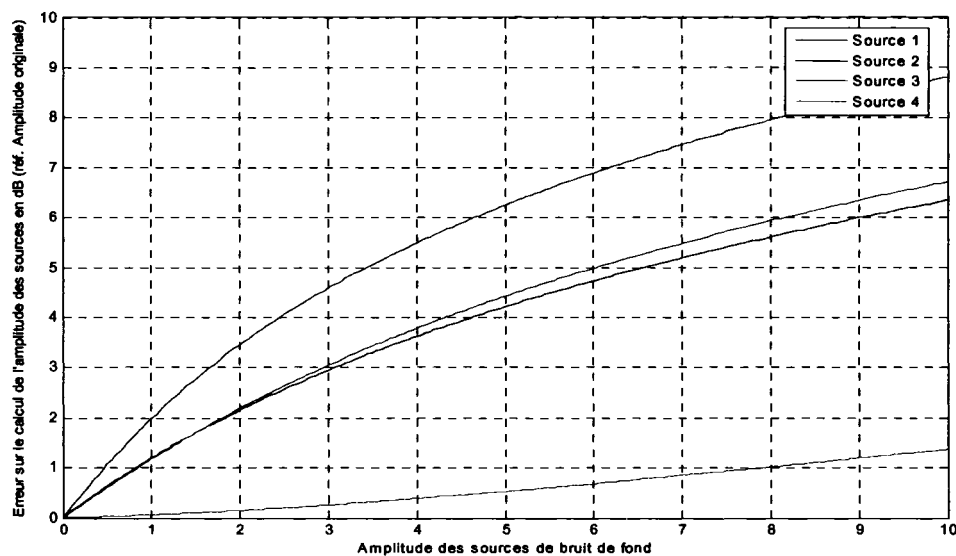


Figure 20 Ajout de deux sources de bruit non modélisées, une près de la source 1 et l'autre à un endroit quelconque, similaire à du bruit de fond

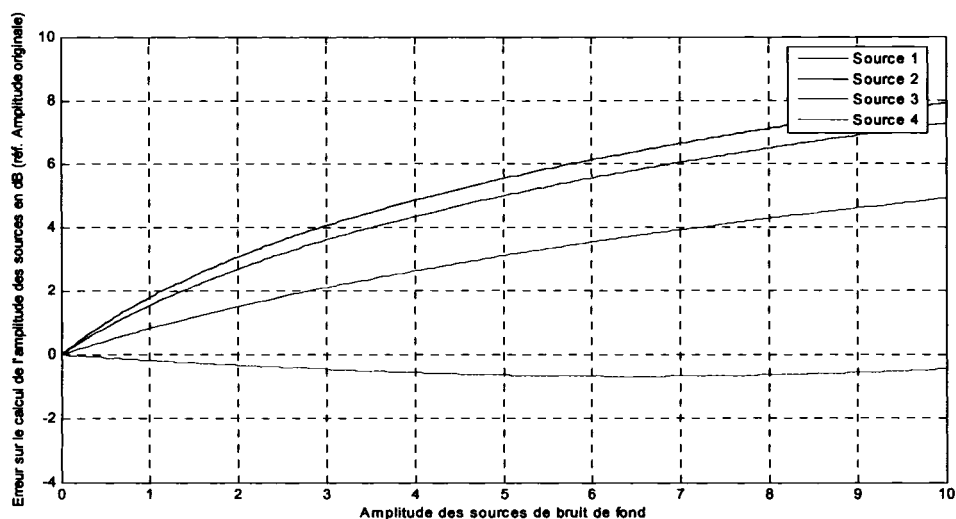


Figure 21 Ajout de deux sources de bruit non modélisées, une près de la source 1 et l'autre à un endroit quelconque, similaire à du bruit de fond, fréquence des sources à 40Hz

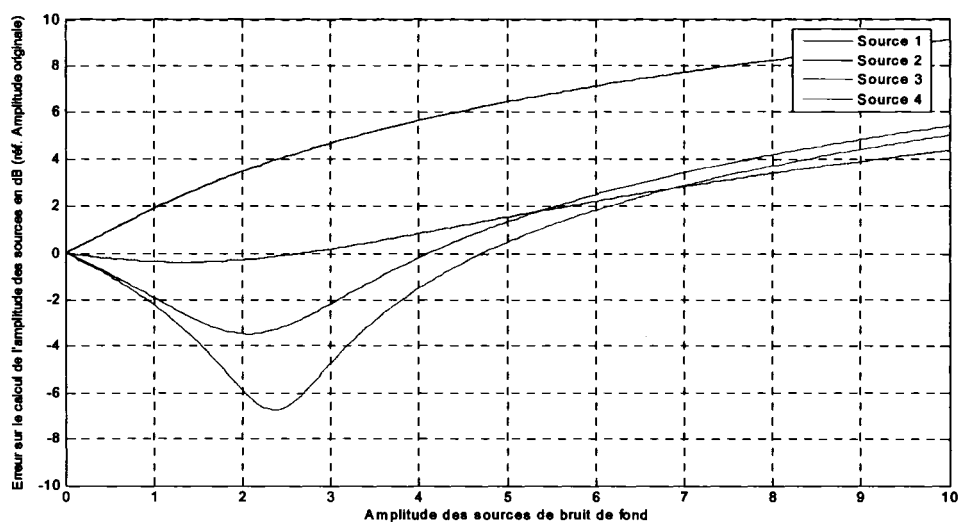


Figure 22 Ajout de deux sources de bruit non modélisées, une près de la source 1 et l'autre à un endroit quelconque, similaire à du bruit de fond, fréquence des sources à 4000Hz

2.4 Adéquation de l'IFRF

Au départ, cette méthode d'identification semblait prometteuse. Elle possède beaucoup de qualités qui, malheureusement, reposent sur des concepts qui sont difficiles à rencontrer avec des systèmes mécaniques réels. Cette méthode ne peut tenir compte des variations dans le contenu fréquentiel des sources, autant pour les fréquences que pour la phase relative.

Les simulations de ce chapitre avaient pour objectif de voir la sensibilité de la méthode sur les variations de positionnement des sources et des microphones et la présence de sources qui ne seraient pas prises en compte dans les mesures. Ces simulations ont fait ressortir certaines lacunes.

La précision dans la localisation des sources semble être critique. Il a été démontré qu'une erreur de localisation de quelques centimètres pouvait entraîner des erreurs de plusieurs dB.

La présence de sources parasites (ayant un contenu fréquentiel similaire) est aussi un facteur non négligeable. Il ne faut donc pas oublier de source et, à la limite, en mettre plus, quitte à avoir des contributions nulles. Donc pour contourner ce problème, il faut ajouter plus de microphone, ce qui augmente les difficultés et diminue les chances de succès.

Les difficultés associées à l'application de l'IFRF à des systèmes mécaniques réels font que cette méthode n'est pas adéquate à la problématique.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE POUR LA TECHNIQUE DE RECONNAISSANCE

Le but de ce projet est de permettre l'identification et la quantification de sources de bruit dans un système mécanique complexe. Il existe plusieurs méthodes permettant d'atteindre cet objectif. La plupart nécessitent que les sources soient fortement distinctes comme ayant un contenu fréquentiel différents ou étant espacées physiquement. Les autres méthodes usuelles requièrent que les sources aient des caractéristiques particulières à l'application des dites méthodes. Il suffit de penser à l'holographie acoustique qui requiert que les sources soient dans un plan.

Pour notre problématique, comme vu dans la revue de la littérature, ces méthodes d'identification ne fonctionnent pas. Si les sources de bruit ne sont pas dans un plan, qu'elles sont générées par impact et qu'elles ont un contenu fréquentiel similaire alors il n'existe aucune méthode actuelle permettant de traiter un tel système. Cette section propose une nouvelle méthode qui permet de reconnaître les sources de bruit dans de telles conditions.

La première partie sera consacrée à la description, de façon globale, de la méthodologie proposée. La deuxième partie portera sur un exemple descriptif de l'application de la méthodologie. Dans ce cas-ci, l'exemple utilisé sera le système d'entraînement par chenille. À la dernière partie, chacune des étapes de la méthodologie sera reprise en expliquant les outils nécessaires à son application.

3.1 Description de la méthodologie

Cette section est une description qualitative de la méthodologie proposée. La méthodologie proposée comporte 3 étapes :

- 1- Caractérisation du système,
- 2- Caractérisation des sources probables,
- 3- Reconnaissance des sources.

À la fin de cette section, l'auteur fera une mise en garde relativement à la méthode proposée.

3.1.1 Caractérisation du système

La première étape consiste à caractériser le système mécanique dans son ensemble. Il faut essayer de déterminer quelles sont les sources individuelles probables et quel est le mode de génération de ces sources (impact ou autre). Pour ce faire, il existe plusieurs outils. Dans un premier temps, il faut analyser le fonctionnement du système. Il existe également certaines méthodes d'analyse qui peuvent donner plusieurs informations pertinentes. Par exemple, les signaux temporels ou, si besoin, les distributions temps-fréquence permettent d'identifier s'il y a des impacts ou des discontinuités (Meltzer et Ivanov, 2003). La corrélation ou l'auto corrélation permettent d'identifier les séquences répétitives dans le signal. Ces informations préliminaires guideront la suite de l'analyse et en particulier la façon dont seront caractérisées les sources individuellement.

3.1.2 Caractérisation des sources probables

La deuxième étape consiste à caractériser les sources probables. Si, dans le système qui nous intéresse, les sources sont générées par impact, il faut donc caractériser les sources en générant des impacts locaux, à l'aide d'un marteau d'impact par exemple. Si les sources ne sont pas générées par impact mais qu'il s'agit de rayonnement acoustique par vibration alors la caractérisation se fait à l'aide d'un pot vibrant. Évidemment la qualité de la caractérisation est fortement liée à l'adéquation entre l'excitation individuelle et

l'excitation en fonctionnement réel. L'excitation individuelle des sources devient le signal de référence pour l'étape de reconnaissance.

3.1.3 Reconnaissance des sources

La troisième étape consiste à appliquer la méthode de reconnaissance. Il existe plusieurs méthodes qui permettraient de faire cette reconnaissance. Quelques unes ont été élaborées dans l'optique de la reconnaissance de la parole, d'autres dans l'optique du filtrage et du traitement des signaux de communications. Parmi celles-ci, 4 ont été choisies afin de couvrir une gamme de possibilités la plus vaste possible. Rappelons que notre problématique concerne les sources de bruit impulsionnelles, les méthodes choisies ont donc toutes certaines caractéristiques pouvant être reliées à notre problématique. Ces méthodes sont :

- 1- La corrélation : la corrélation est utilisée pour vérifier la ressemblance entre 2 signaux temporels. Cette méthode a l'avantage d'être simple et facile à mettre en œuvre. Pour notre problématique, il est possible de calculer la corrélation entre le signal de référence et le signal global. Un niveau de corrélation suffisamment élevé signifiera que le signal de référence est présent dans le signal global.
- 2- Les distributions temps-fréquence de Wigner-Ville (WVD) : les distributions de Wigner-Ville permettent de caractériser un signal autant en fréquence qu'en temporel. Pour effectuer la reconnaissance, il faut effectuer une WVD du signal de référence et le superposer à la WVD du signal global. En fait, c'est un peu comme effectuer une corrélation en 2 dimensions.
- 3- Les ondelettes : les ondelettes sont utilisées fréquemment pour détecter des variations brusques, ou impacts, dans un signal. Elles sont de plus en plus utilisées pour effectuer de la reconnaissance de la parole. Le processus de reconnaissance est similaire à celui de la WVD.

- 4- Le filtrage temporel : les filtres temporels seront utilisés afin d'extraire la contribution d'un signal en particulier compris dans un signal composite. L'approche privilégiée sera d'utiliser l'inverse de la réponse impulsionnelle du signal recherché comme filtre. La réponse de ce filtre est un peigne d'impulsions synchronisées avec le signal recherché. De plus, l'amplitude des impulsions correspond à la contribution énergétique de ce signal.

Chacune de ces méthodes de reconnaissance sera revue et analysée plus en profondeur dans la dernière partie de cette section.

3.1.4 Mise en garde

Il est évident que la méthodologie proposée n'est pas exhaustive et dépend fortement de la façon dont elle est appliquée. Il faut faire preuve d'un bon jugement dans les hypothèses appliquées. Pensons seulement à la façon dont la génération du bruit d'une source sera reproduite. Il ne faut pas craindre mais plutôt encourager l'utilisation d'autres outils ou d'autres méthodes de reconnaissance afin de renforcer nos hypothèses. Par exemple, l'information obtenue en appliquant une distribution temps-fréquence à un signal peut être très précise et utile.

3.2 Exemple du processus d'application de la méthodologie proposée dans le cas d'un système d'entraînement par chenille

Afin de bien saisir les détails de la méthodologie proposée, toutes les étapes du processus seront reprises et expliquées à l'aide d'un exemple. L'exemple utilisé sera le système d'entraînement par chenille.

3.2.1 Caractérisation du système d'entraînement par chenille

L'analyse physique du système d'entraînement, appuyé par les mesures expérimentales préliminaires, montre une grande quantité de sources de bruit possibles (figure 23).

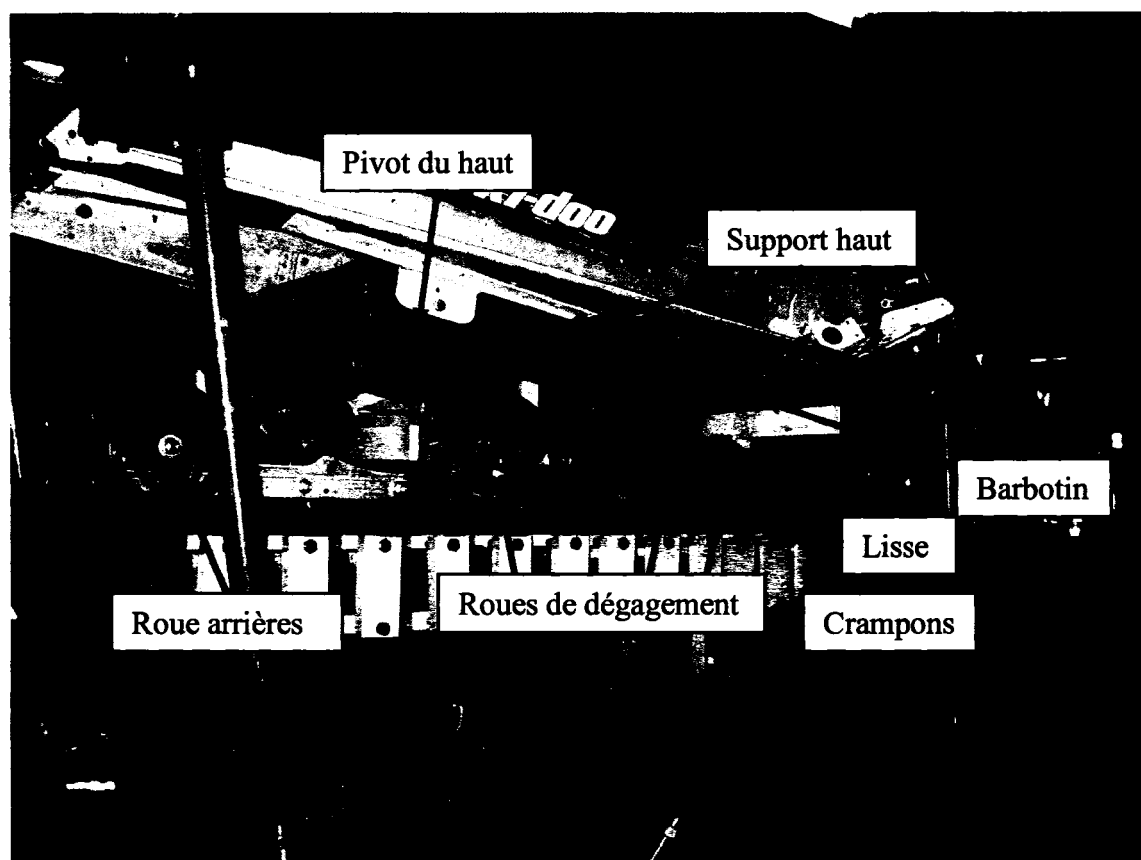


Figure 23 Système d'entraînement par chenille et les principales sources de bruit

Pour la plupart de ces sources, le bruit généré provient d'impact ou de contact entre les composantes du système. À ce stade-ci, les sources de bruit probables sont :

Impact entre le barbotin et les dents de traction :

- Rayonnement du barbotin

- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement du tunnel

Impact entre le barbotin et la chenille, à l'endroit où se situent les renforts :

- Rayonnement du barbotin
- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement du tunnel

Impact entre les agrafes et les lisses inférieures de la suspension :

- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement des lisses et des rails

Impact entre la chenille, à l'endroit où se situent les renforts et les lisses inférieures de la suspension,

- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement des lisses et des rails

Impact entre la chenille, à l'endroit où se situent les renforts et les roues de dégagement inférieures :

- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement des roues

Impact entre la chenille, à l'endroit où se situent les renforts et les roues arrières :

- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement des roues

Impact entre la chenille, à l'endroit où se situent les renforts et les roues du tunnel :

- Rayonnement de la chenille
- Rayonnement des roues
- Rayonnement du tunnel

3.2.2 Caractérisation d'une source probable

Pour les fins de cet exercice, une source de bruit a été choisie arbitrairement : le barbotin. Le barbotin en soit peut avoir 3 origines de rayonnement de bruit :

- 1- Impact entre le barbotin et les dents de traction,
- 2- Impact entre le barbotin et les renforts de chenille,
- 3- Vibration de l'arbre d'entraînement.

Les deux premières sources de rayonnement sont liées à l'interaction entre la chenille et le barbotin et la troisième vient de l'entraînement mécanique du barbotin. Il faut maintenant caractériser ces 3 origines de rayonnement. Le rayonnement acoustique du barbotin est mesuré lorsque soumis à des impacts tangentiels sur les dents pour caractériser les impacts des dents de traction. Avec des impacts normaux au barbotin, le rayonnement des impacts des renforts de chenille est caractérisé. Ces impacts, pour être représentatifs, doivent être faits avec un marteau équipé d'un embout mou représentant le caoutchouc de la chenille. Le rayonnement acoustique venant des vibrations de l'arbre d'entraînement est caractérisé à l'aide d'un pot vibrant. Ainsi, pour chacune de ces trois origines de rayonnement, un signal de référence distinctif est obtenu.

3.2.3 Reconnaissance du signal du barbotin dans le signal global

La troisième étape consiste à appliquer la méthode de reconnaissance. Avant de procéder, il faut construire des signaux de référence compatibles avec le signal global. À l'aide des outils disponibles, il faut déterminer la fréquence d'occurrence des impacts et les localiser dans le temps. Ensuite, si une méthode de reconnaissance temporelle est utilisée, il faut modifier les signaux de référence afin qu'ils soient synchronisés avec le signal global. En fait il s'agit de coller bout à bout, en utilisant un fenêtrage temporel pour éviter un brusque changement d'amplitude à la jonction, des segments du signal de référence représentant un impact. Par exemple, si la chenille tourne à une vitesse

général 75 impacts à la seconde (soit un temps de 0,013s par impact), il faut que le signal de référence ait également 75 impacts à la seconde (et une fenêtre temporelle de 0,013s). Ensuite vient l'étape de reconnaissance proprement dite avec une phase d'optimisation.

3.3 Outils nécessaires à chaque étape de la méthodologie

Dans cette section, chacune des étapes de la méthodologie sera revue en expliquant les outils nécessaires à son application. Pour les méthodes de reconnaissance, les équations propres à leur application seront présentées.

3.3.1 Caractérisation du système

Les outils nécessaires à la caractérisation du système global sont souvent les plus connus et les plus utilisés. Il s'agit de mesures de pression acoustique ou d'intensité prises autour du système mécanique pour le caractériser dans son ensemble. Ainsi sa puissance acoustique et sa contribution dans le système global sont connues. À l'aide de la compréhension du fonctionnement du système, il est alors possible d'établir la liste des sources de bruit probables. D'autres mesures ou analyses (distribution temps-fréquence, camouflage, etc.) plus approfondies des mesures déjà faites peuvent être nécessaires pour éliminer certains doutes quant à la contribution des sources.

3.3.2 Caractérisation des sources probables

À partir de la liste des sources probables, il faut déterminer celles qui seront étudiées. Dans l'exemple précédent, il s'agissait de la contribution du barbotin dans le système global. Pour bien caractériser une source, il faut connaître les efforts (en fait il faut chercher les **variations** d'effort) qui sont générés lors du fonctionnement du système. Ces efforts sont, dans la majorité des cas, la cause de la génération du bruit.

La caractéristique désirée pour chacune des sources est un signal de référence. Pour être bien représentatif, le signal de référence doit correspondre au signal de la source lors du fonctionnement normal du système. Il faut donc obtenir une signature acoustique de la source en recréant, sous contrôle, les efforts qui ont lieu lors du fonctionnement normal du système. On parle ici de marteau d'impact pour représenter des impacts ou de pot vibrant pour représenter des vibrations plus continues. Ces signaux de référence peuvent être obtenus en excitant les composantes individuellement, il n'est pas nécessaire d'avoir le système au complet.

Une fois les signaux de référence obtenus, leur utilisation dépend de la méthode de reconnaissance utilisée. Pour les méthodes de reconnaissance temporelles, comme la corrélation ou le filtrage temporel, le signal de référence est simplement la trace temporelle obtenue lors de l'excitation individuelle des sources. Pour les autres méthodes de reconnaissance, la trace temporelle doit être traitée adéquatement : décomposition par ondelettes ou distribution temps-fréquence.

3.3.3 Reconnaissance

Comme mentionné à la section 3.1.3, 4 méthodes de reconnaissance ont été retenues. Ces méthodes sont :

- 1- Corrélation,
- 2- Distribution temps-fréquence Wigner-Ville,
- 3- Ondelettes,
- 4- Filtrage des signaux temporels.

Chacune de ces méthodes de reconnaissance sera présentée en détail ainsi que les équations gouvernant leur fonctionnement. L'application de ces méthodes à la

reconnaissance de signaux sera vue au CHAPITRE 4 Vvalidation de la reconnaissance à l'aide de signaux simulés.

3.3.3.1 Corrélation

Les principes de la corrélation sont très simples : il s'agit en fait de comparer un signal temporel de référence avec un autre signal temporel. La comparaison se fait à l'aide d'un produit de convolution (Sakurai, Saki et Ando, 2001 et Beranek et Ver, 2001) :

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} x(t)y(t + \tau)dt \quad (3.1)$$

Plus les valeurs de R_{xy} sont élevées plus les signaux x et y se ressemblent. Comme il s'agit d'un produit de convolution où les 2 signaux « glissent » l'un sur l'autre, il y aura une augmentation de R_{xy} à chaque moment où les signaux se ressemblent. Donc pour une reconnaissance de signal, il faut que R_{xy} soit suffisamment élevé. Le niveau de R_{xy} à obtenir pour être confiant d'avoir détecté la présence du signal de référence reste à déterminer. Dans (Wang et Libert, 1994), ils utilisent une banque de 105 échantillons pour définir les valeurs de corrélation pour définir qu'il y a reconnaissance ou pas.

3.3.3.2 Distribution temps-fréquence

La distribution temps-fréquence la plus connue est le spectrogramme où, en familièrement en anglais, la « Short-Time Fourier Transform » (STFT). Il existe également des distributions temps-fréquence basées sur la densité énergétique, comme les distributions Wigner-Ville, certainement les plus connues parmi celles-ci. Comme pour la décomposition par ondelettes (qui sera vue dans la section suivante), la résolution temps-fréquence de ces distributions est déterminée par un ensemble de

fonctions élémentaires correspondantes (Levin, 2002 et Meltzer et Ivanov, 2003). Comme la relation entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle d'une fonction est gouvernée par une « fonction d'incertitude » (Flandrin, 1998), ni le spectrogramme ni la décomposition par ondelettes ne peuvent avoir une résolution fine en temps et en fréquence de façon simultanée. Il s'agit en fait de l'inégalité d'Heisenberg-Gabor :

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (3.2)$$

Au sens des définitions choisies pour la durée temporelle Δt et la bande spectrale Δf , le produit $\Delta t \cdot \Delta f$ de tout signal est borné inférieurement.

Les distributions Wigner-Ville décomposent l'énergie du signal en termes temporels et fréquentiels simultanément. Par contre, le principal obstacle pour appliquer ces distributions est la présence d'interférences (« cross-terms ») qui peuvent être presque aussi importantes que le signal lui-même (Chiollaz et Favre, 1993).

La distribution de Wigner-Ville est calculée en corrélant le signal avec une version décalée, en temps et en fréquence, de lui-même (Qian, 2002). Contrairement à la STFT et à la décomposition par ondelettes, il n'y a pas de fonction élémentaire (ou fenêtrage) prédéterminée.

Pour un signal $s(t)$, la distribution de Wigner-Ville est (Matz et Hlawatsch, 2003) :

$$WVD_s(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3.3)$$

où le produit $s\left(t + \frac{\tau}{2}\right)s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)$ est la symétrie Hermitienne en τ . Une distribution de Wigner-Ville est dite bilinéaire parce que le signal entre 2 fois dans son calcul. De plus, la distribution Wigner-Ville n'est pas sensible au décalage de phase.

Il existe une méthode permettant de diminuer les interférences (« cross-term ») générées lors du calcul de la distribution de Wigner-Ville. Comme ces interférences oscillent fortement, il est possible de les atténuer en appliquant un filtre passe-bas de 2 dimensions (Qian, 2002 et Pan et Chen, 2003). La convolution 2D de la distribution de Wigner-Ville résultante est appelée en anglais « Smoothed Wigner-Ville Distribution » et est définie par :

$$SWVD_s(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x, y) WVD_s(t - x, \omega - y) dx dy \quad (3.4)$$

où $\phi(t, \omega)$ est le filtre passe-bas 2D. Cette dernière distribution est une des nombreuses représentations de la transformée bilinéaire temps-fréquence, aussi appelée Classe de Cohen (« Cohen's Class »).

3.3.3.3 Ondelettes

Une façon commune d'étudier les caractéristiques d'un signal est de le décomposer en une série de fonctions prédéterminées. Par exemple, la transformé de Fourier compare le signal à des fonctions de sinus de fréquences déterminées. La transformée par ondelettes fonctionne sur le même principe. Les fonctions utilisées, appelées ondelettes (« Wavelets »), sont prédéfinies et proviennent de fonctions dont l'échelle temporelle a été modifiée (Qian, 2002 et Huynh, 1998). Une distribution temps-fréquence

d'ondelettes s'appelle la transformée *temporelle continue par ondelettes* ou « Continuous-time Wavelet Transform (CWT) ». La CWT est définie par :

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.5)$$

où $s(t)$ est le signal étudié, $\Psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ est la fonction de l'ondelette, a est le facteur d'échelle et b est le décalage temporel. L'information contenue dans une CWT est similaire à celle contenue dans une SWVD mais en faisant mieux ressortir les discontinuités temporelles.

Il existe une autre façon d'utiliser les ondelettes pour étudier les caractéristiques d'un signal temporel. Il s'agit de décomposer le signal en deux parties, une partie « passe haut » et une partie « passe bas ». Ensuite chacune des parties est décomposée en deux parties, « passe haut » et « passe bas », et ainsi de suite jusqu'à atteindre le niveau de décomposition souhaité. On obtient ainsi une décomposition en forme d'arbre comme à la figure suivante.

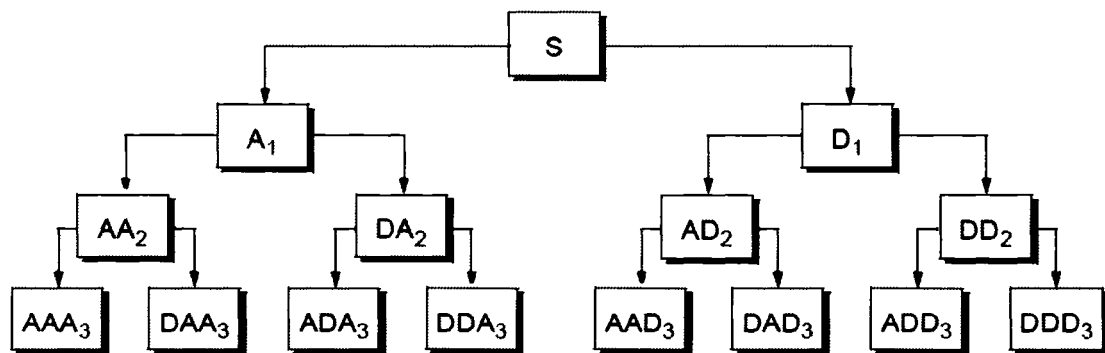


Figure 24 Arbre de décomposition par ondelettes, A signifie approximation (passe bas dans ce cas), et D signifie détail (passe haut dans ce cas)

Pour discerner quelles décompositions sont les plus pertinentes à notre signal, il faut retenir les niveaux de décomposition qui possèdent suffisamment d'énergie ("threshold" en anglais). Par exemple, seules les branches de l'arbre qui ont un niveau énergétique supérieur à 10% de l'énergie initiale doivent être gardées. La figure 25 montre un tel exemple. Le pourcentage (ou "threshold") doit être choisi adéquatement. Pour ce faire, il faut vérifier la sensibilité de la détection de notre signal de référence dans des situations contrôlées, un peu comme il sera fait dans le prochain chapitre.

Un autre cas peut se produire où la source de référence a une section de son arbre de décomposition sous le "threshold". Si cette section est unique à la source de référence, il serait techniquement possible de pouvoir identifier celle-ci. Les erreurs potentielles dans ces conditions seraient élevées parce que, même si cette partie de l'arbre de décomposition est dite unique à la source de référence, les autres sources auront quand même de l'énergie. L'erreur serait de surestimer la source de référence.

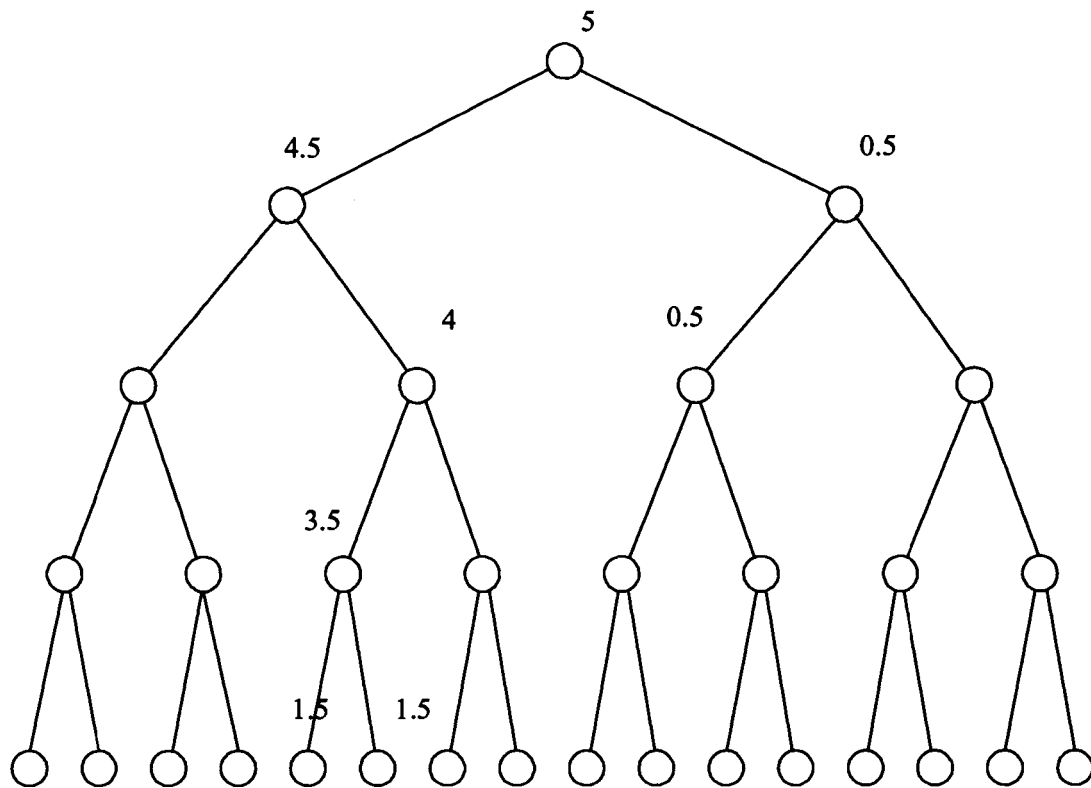


Figure 25 Exemple de décomposition par ondelettes avec seulement les branches significatives montrées

La forme de l'arbre, avec les branches significatives, peut être une représentation caractéristique d'un signal donné. Ce genre de décomposition est utilisé dans des méthodes de reconnaissance de la parole.

3.3.3.4 Filtrage des signaux temporels

Le filtrage de signaux temporels utilisé sera celui connu sous le nom de filtrage avec l'inverse de la réponse impulsionnelle. Pour notre problématique, sources d'impact fortement amorties, les signaux temporels ressemblent à des sinusoïdes amorties. Pour une de ces sources, le signal temporel est composé comme suit :

$$y_i(t) = x_i(t) * h_i(t) \quad (3.6)$$

Où $y_i(t)$ est le signal du rayonnement acoustique de la structure i lorsqu'elle est excitée par l'impact $x_i(t)$. Le terme $h_i(t)$ représente la réponse impulsionnelle de la structure. En théorie, en prenant la convolution du signal $y_i(t)$ avec l'inverse de la réponse impulsionnelle $h_i(t)$, on obtient le signal d'excitation $x_i(t)$:

$$x_i(t) = x_i(t) * h_i(t) * h_i^{inv}(t) = y_i(t) * h_i^{inv}(t) \quad (3.7)$$

Dans cette application, l'inverse de la réponse impulsionnelle agit comme un filtre. En fait, il s'agit du filtre inverse de la réponse impulsionnelle et pour tout filtre dont le spectre n'est jamais exactement nul, il existe toujours un filtre inverse. Pour l'obtenir, il faut donc passer du domaine temporel au domaine fréquentiel et trouver son inverse. L'équation 3.6 exprimée dans le domaine fréquentiel devient :

$$Y_i(f) = X_i(f) \cdot H_i(f) \quad (3.8)$$

Pour notre application, on désire retrouver un signal de forme donnée, $y_i(t)$, dans un signal composite, $y(t)$. La réponse impulsionnelle cherchée est donc $y_i(t)$. L'inverse de la réponse impulsionnelle peut être obtenue par :

$$H_i^{inv}(f) = \frac{1}{H_i(f)} = \frac{X_i(f)}{Y_i(f)} = \frac{1}{Y_i(f)} \quad (3.9)$$

parce que $X_i(f) = 1$

Ou, exprimée dans le domaine temporel :

$$h_i^{inv}(t) = IFFT\left(\frac{1}{Y_i(f)}\right) \quad (3.10)$$

Où IFFT est la transformée de Fourier inverse. Cette méthode est une approximation parce que $y_i(t)$ n'est pas de longueur infinie et qu'il n'est pas composé d'une somme de signaux périodiques. Pour que cette approximation soit acceptable, il faut que $y_i(t)$ soit le plus long possible, il faut donc faire du « zero padding » soit ajouter une série de zéro à la fin d'un segment afin d'en augmenter la longueur.

De façon globale, pour un signal composite fait de n sources de bruit :

$$y(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) * h_i(t) \quad (3.11)$$

La convolution de ce signal avec l'inverse de la réponse impulsionnelle d'une des sources (supposons que ce soit la source 1) donne :

$$y(t) * h_1^{inv}(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) * h_1^{inv}(t) \quad (3.12)$$

$$y(t) * h_1^{inv}(t) = y_1(t) * h_1^{inv}(t) + y_2(t) * h_1^{inv}(t) + \dots + y_n(t) * h_1^{inv}(t) \quad (3.13)$$

La convolution avec la source 1 donne une série de dirac ou peigne d'impulsions représentant la série d'impacts d'excitation de cette source. Pour que cette méthode soit parfaite, il faudrait que l'énergie des autres convolutions soit nulle. Ce n'est malheureusement pas le cas. Si cette énergie est trop importante et camouffle le peigne d'impulsions alors cela risque d'être difficile d'identifier la source désirée.

Pour améliorer les chances d'identification, il est possible d'utiliser la pseudo inverse de la réponse impulsionnelle. La pseudo inverse consiste simplement à conserver l'énergie

des bandes fréquentielles d'intérêt lors du calcul de l'inverse de la réponse impulsionnelle. En procédant de cette façon, les autres zones spectrales seront minimisées. Par contre, si d'autres sources ont exactement les mêmes bandes spectrales que la source cherchée alors la reconnaissance sera impossible.

CHAPITRE 4

VALIDATION DE LA RECONNAISSANCE À L'AIDE DE SIGNAUX SIMULÉS

Ce chapitre est consacré à la première phase de validation des méthodes de reconnaissance proposées à la section précédente. Seul des signaux simulés seront utilisés dans cette phase de validation. Le Chapitre 5 Validation expérimentale à l'aide d'un banc d'essai générant des impacts répétitifs utilisera des signaux expérimentaux pour la validation. La validation à l'aide de signaux simulés a pour but de vérifier le comportement des différentes méthodes de reconnaissance vis à vis de signaux représentatifs de la problématique. À ce stade du projet, il est important de bien contrôler les paramètres des signaux afin d'évaluer les capacités des différentes méthodes de reconnaissance.

Les validations porteront sur les 4 méthodes de reconnaissance présentées au Chapitre 3 Méthodologie proposée pour la technique de reconnaissance. Mais avant de voir ces 4 méthodes, il y aura une section consacrée à définir quels genres de signaux simulés seront utilisés. Les différents termes utilisés dans ce chapitre seront également définis dans cette section. Ensuite, pour chaque signal simulé, chacune des 4 méthodes de reconnaissance sera appliquée. Ces 4 méthodes sont :

- 1- Corrélation,
- 2- Distribution temps-fréquence Wigner-Ville,
- 3- Ondelettes,
- 4- Filtrage des signaux temporels.

Une conclusion globale terminera cette section en énumérant les méthodes qui seront reprises pour une validation à l'aide de signaux expérimentaux.

4.1 Signaux simulés utilisés pour l'évaluation des méthodes de reconnaissance

La problématique étudiée concerne les systèmes mécaniques générant des impacts périodiques. Dans l'exemple présenté à la figure 23, les différentes sources de bruit sont excitées par les impacts entre les composants. De plus, la périodicité des impacts est la même pour toutes les sources de bruit. Nous sommes donc en présence de chocs répétés, à intervalle régulier, localisés à plusieurs endroits. Chacun de ces endroits est une source potentielle de bruit.

Le rayonnement acoustique généré par un choc réel va être composé d'une partie transitoire, ou attaque, dû au rayonnement localisé dans la zone d'impact. Immédiatement après, suivra une partie pseudo périodique, due au rayonnement des ondes propagées dans la structure impactée. Cette partie pseudo périodique peut être vue comme une somme de signaux harmoniques aux fréquences propres excitées dans la structure. Ces signaux décroissent dans le temps à cause de l'amortissement (interne et rayonnement).

Le signal de base de la simulation sera une sinusoïde, qui débute brusquement au moment de l'impact, et qui décroît exponentiellement afin de représenter l'amortissement. Il s'agit d'un signal simple qui représente à la fois la partie transitoire par le passage de 0 à une valeur maximale et la partie rayonnante d'un mode. Une source, pour nos simulations, sera composée d'une sommation de plusieurs sinusoïdes décroissantes pour bien représenter les différents modes rayonnants. L'équation suivante représente cette sommation pour une source composée de n fréquences de rayonnement.

$$signal = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) e^{-\alpha_i t} \quad (4.1)$$

où

n = nombre de fréquences composant le rayonnement acoustique,

A_i = amplitude liée à la fréquence i ,

ω_i = fréquence i composant le rayonnement acoustique,

ϕ_i = phase liée à la fréquence i ,

α_i = terme d'amortissement liée à la fréquence i ,

t = vecteur temporel.

Notons ici que dans le présent texte, le terme fréquence sera utilisé pour désigner le contenu fréquentiel du rayonnement acoustique des sources de bruit. Le terme fréquence ne servira pas à désigner l'occurrence des impacts. Dans ce cas, l'auteur utilisera le terme occurrence exclusivement.

La figure 26 montre deux exemples de signaux générés. Sur ces 2 signaux, il est possible de voir les impacts répétitifs. Dans le premier cas, le signal est presque complètement amorti entre chaque impact. Dans le deuxième cas, l'impact suivant se produit avant que le signal soit complètement amorti, il est donc plus difficile de distinguer les impacts les uns des autres. Ces signaux, comme tous ceux utilisés dans ce chapitre, ont une fréquence d'échantillonnage de 10 000 Hz.

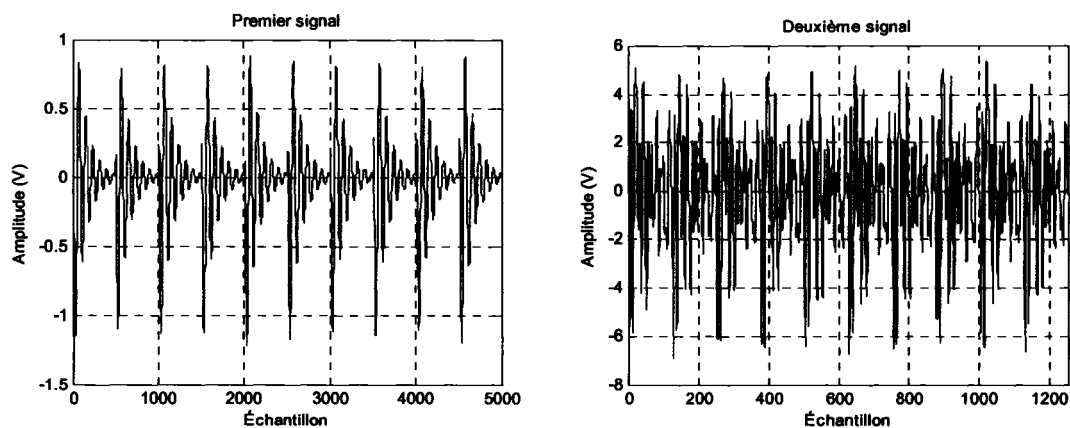


Figure 26 Exemples de signaux générés. Premier signal : signal presque complètement amorti entre les impacts, donc bien distincts. Deuxième signal : signaux peu amortis entre les impacts, donc peu distincts

En regardant de plus près le premier signal de la figure 26, il est possible de voir des variations dans la trace temporelle d'un impact au suivant (figure 27). Ces variations ont été volontairement introduites aléatoirement lors de la génération des signaux dans le but de représenter les variations des systèmes mécaniques réels. L'amplitude et la phase de la sinusoïde ont des variations de moins de 2,5%. Les fréquences du rayonnement acoustique et le taux d'amortissement (par l'intermédiaire du coefficient α) ont des variations de moins de 1,5%. Il faut toutefois mentionner que les variations induites ne sont pas suffisantes pour compromettre la reconnaissance des signaux de référence. Mentionnons également que ces variations sont répertoriées lors de la génération des signaux et peuvent donc être retracées.

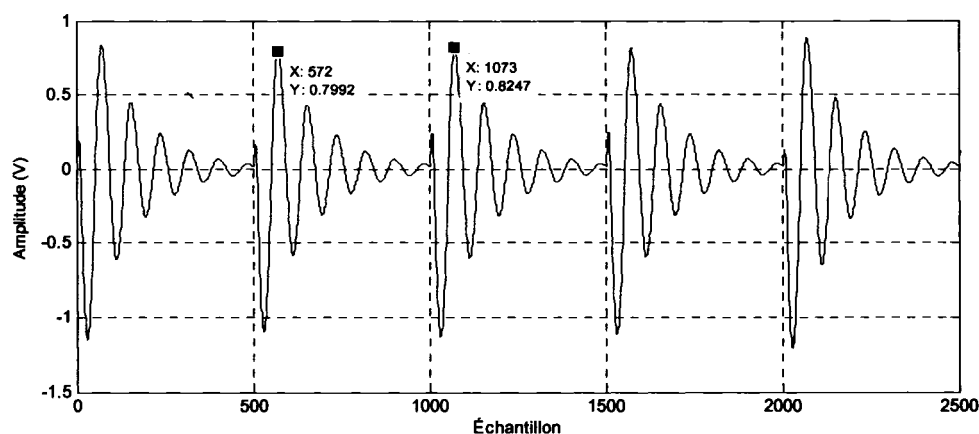


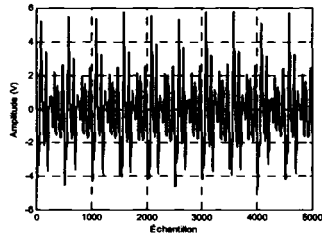
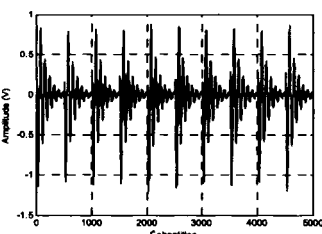
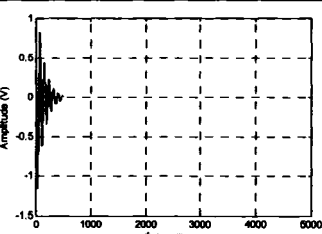
Figure 27 Variations dans les signaux générés (premier signal de la figure 26)

Les signaux sont composés d'une ou plusieurs sources de bruit, incluant la source de référence. Chaque source est composée d'une ou plusieurs fréquences au rayonnement acoustique amorti. Par exemple, un signal peut être composé de 3 sources de bruit (dont une est la source de référence) ayant chacune un rayonnement composé de 3 fréquences. Le signal est donc composé de 9 fréquences amorties. Mentionnons que la contribution de la source de référence est connue dès le départ.

Par définition, le signal de la source de référence est composé de plusieurs impacts successifs et sa durée est identique à celle du signal global. Le signal de référence est composé d'un seul impact. Le tableau suivant résume les différents termes utilisés dans cette section.

Tableau IV

Définition des termes utilisés dans cette section

Terme	Définition	Représentation
Signal global	Signal composé de plusieurs impacts successifs provenant d'une ou plusieurs sources ayant une ou plusieurs fréquences de rayonnement	
Signal de la source de référence	Signal composé de plusieurs impacts successifs provenant d'une source ayant une ou plusieurs fréquences de rayonnement	
Signal de référence	Signal composé d'un seul impact provenant du signal de référence	

4.2 Validation à l'aide de signaux simulés

Cette section servira à valider les différentes méthodes de reconnaissance à l'aide de signaux simulés. Dans un premier temps, les 4 méthodes de reconnaissance seront présentées avec leur mode de fonctionnement. Puis viendra la partie des validations où chaque méthode de reconnaissance sera appliquée au même signal. Il sera ainsi facile de comparer les différentes méthodes entre elles.

4.2.1 Méthodes de reconnaissance

Corrélation

Cette approche consiste à faire glisser un sur l'autre un signal et un signal de référence. Plus les deux signaux sont semblables plus la valeur de corrélation est élevée. En théorie, plus les signaux temporels sont longs, plus la valeur de corrélation est élevée. Afin de rendre cette valeur plus significative, il est possible de la pondérer. Dans notre cas, la valeur de la corrélation entre le signal global (x) et le signal de référence (y) est pondérée par l'auto corrélation du signal de référence $\frac{R_{xy}(\tau)}{R_{yy}(\tau)}$. Cette valeur représente

la relation d'amplitude entre l'estimé de la contribution de la source de référence et le du signal de référence. Par exemple, une valeur de 1,5 signifie que l'amplitude estimée de la contribution de la source de référence est 1,5 fois supérieure à l'amplitude du signal de référence utilisé.

Le critère de reconnaissance dépend de cette valeur. La reconnaissance d'un signal se fait si le niveau de corrélation dépasse un seuil prédéfini. Ce seuil est déterminé en utilisant des signaux connus et dépend fortement du signal de référence.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville

Cette méthode de reconnaissance consiste à analyser les variations du contenu fréquentiel du signal en fonction du temps. En utilisant une distribution de Wigner-Ville avec des paramètres d'affinage, SWVD (« Smoothed Wigner-Ville Distribution »), comme décrit à la section 3.3.3.2 Distribution temps-fréquence, il est possible d'obtenir une distribution ayant une bonne résolution en temps et en fréquence. Les paramètres d'affinage (« Smoothed ») sont utiles pour diminuer les interférences (« cross-term ») propres à ce genre de distribution.

Il y a 2 façons d'effectuer une reconnaissance de signal à l'aide d'une distribution temps-fréquence. La première, la plus simple, est de distinguer la zone temps-fréquence où le signal de référence est présent. Cette façon de procéder est très simple mais difficile à rencontrer avec des signaux réels. Il faut que les sources aient au moins un des deux paramètres (temps ou fréquence) de différents sinon elles sont confondues.

La deuxième façon, plus difficile à exécuter mais moins restrictive, consiste à définir une zone temps-fréquence représentative de la source de référence qui deviendra notre gabarit (appelée signature temps-fréquence dans Chiollaz et Favre (1993)). Ensuite en utilisant ce gabarit comme filtre temps-fréquence sur la distribution temps-fréquence du signal global il est possible d'obtenir un estimé de la contribution de la source de référence. En fait c'est un peu comme superposer 2 images l'une sur l'autre afin de voir leurs similitudes. L'estimé est obtenu en faisant la somme pondérée des différences d'amplitude (entre le signal global et le signal de référence) à chaque position de la distribution temps-fréquence. L'équation suivante décrit ce processus.

$$SWVD_{\text{estimé}} = \left[1 + \frac{\sum_i \sum_j SWVD_{\text{global}}(i, j) - SWVD_{\text{référence}}(i, j)}{\sum_i \sum_j SWVD_{\text{référence}}(i, j)} \right] \bullet SWVD_{\text{référence}} \quad (4.2)$$

Le ratio de l'estimé est la valeur calculée à l'intérieur des grands crochets. L'écart type sert à déterminer le niveau de ressemblance entre les deux signaux. Il se calcule comme suit :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (\nabla_{i,j} - \bar{\nabla})^2}{(i \bullet j) - 1}} \quad (4.3)$$

où

$$\nabla_{i,j} = SWVD_{\text{global}}(i, j) - SWVD_{\text{référence}}(i, j)$$

$$\bar{\nabla} = \frac{1}{(i \bullet j)} \sum_i \sum_j \nabla_{i,j}$$

Ondelettes

Deux types de variations de reconnaissance à l'aide d'ondelettes seront vus. Le premier utilise la transformée continue d'ondelettes (CWT) et le deuxième utilise la décomposition d'ondelettes. La reconnaissance à l'aide de la **transformée continue** d'ondelettes utilise les mêmes outils mathématique que la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence.

La **décomposition par ondelettes**, comme vu au chapitre 2, consiste à décomposer un signal en une partie « passe haut » et en une partie « passe bas ». Cette décomposition peut être faite sur plusieurs niveaux, chaque partie pouvant être décomposée à nouveau en 2 parties. La décomposition obtenue est appelée arbre de décomposition.

La reconnaissance s'effectue en utilisant des outils mathématiques similaires à ceux utilisés pour les distributions temps-fréquence ou CWT. Ici, par contre, il ne s'agit pas d'un gabarit en 2 dimensions mais des branches significatives de l'arbre de décomposition.

Filtrage des signaux temporels

La réponse du filtre, en utilisant l'inverse de la réponse impulsionnelle comme filtre, est un peigne d'impulsions. L'amplitude des impulsions est directement liée à l'énergie de la source cherchée dans le signal composite. La fréquence des impulsions, quant à elle, est liée à la fréquence des impacts sur la source de référence.

4.2.2 Validation

Plusieurs signaux serviront aux validations. Ils ont été créés afin de vérifier les capacités de reconnaissance des différentes méthodes. Ces capacités de reconnaissance seront validées, étape par étape, avec des signaux de complexité grandissante.

- 1- Pour cette étape, les signaux auront une seule source de bruit, soit la source de référence. Aucune autre source ne sera présente et ceci afin de vérifier les capacités de reconnaissance dans un environnement sans bruit. Le signal de référence sera composé de 1, puis de 3 et finalement de 5 fréquences de rayonnement.
- 2- Pour cette étape, des sources de bruit supplémentaires seront ajoutées. Toutes ces sources, incluant la source de référence, seront composées de signaux ayant une seule fréquence de rayonnement. Les impacts des différentes sources ne seront pas simultanés.
- 3- Pour cette étape, le contenu fréquentiel des sources sera augmenté, passant à 3 fréquences, puis à 5 fréquences. Les impacts des différentes sources ne seront pas simultanés.
- 4- Pour cette étape, les impacts des différentes sources seront simultanés. Ainsi, il sera possible de vérifier les capacités de reconnaissance d'un signal impulsif d'un autre signal qui est simultané.
- 5- Pour cette étape, les impacts seront encore simultanés mais également plus rapide. L'objectif ici est de pouvoir reconnaître un signal plus court, donc ayant une décroissance moins longue.
- 6- Pour cette étape, un bruit de fond aléatoire (aussi appelé bruit blanc parce qu'ayant un contenu fréquentiel uniforme sur sa bande passante) sera ajouté aux autres sources. L'objectif ici est de diminuer le rapport signal sur bruit.
- 7- Pour cette étape, le signal de référence aura une amplitude inférieure à celle du signal de référence. Dans tous les exemples précédents, le signal

de référence était identique au signal de la source de référence. L'objectif ici est double : diminuer le rapport signal sur bruit et vérifier si l'estimation de l'énergie de la source de référence sera adéquate malgré l'inégalité énergétique entre la source et la référence.

- 8- Pour cette étape, la source de référence ne sera pas comprise dans le signal global. L'objectif ici est de vérifier la robustesse des méthodes de reconnaissance : il faut qu'elles donnent une estimation nulle, ou très faible, de l'énergie de la source de référence.

À chaque étape, les figures sont regroupées à la fin de l'étape.

4.2.2.1 Étape 1 : source unique

Pour cette étape, 3 signaux différents seront utilisés. Le premier signal sera composé d'une seule fréquence, le deuxième sera composé de 3 fréquences et le troisième sera composé de 5 fréquences. Dans ce cas, le signal global est composé de seulement la source de référence. Les détails de leur composition sont les suivants :

Signal 1 (41,6 dB) :

	Global	
Fréquence	Référence	
	Amp.	Fréq.
1	1,5	121

Signal 2 (52,1 dB) :

	Global	
Fréquence	Référence	
	Amp.	Fréq.
1	1,5	121
2	2,0	135
3	2,2	210

Signal 3 (61,4 dB) :

	Global	
Fréquence	Référence	
	Amp.	Fréq.
1	1,5	121
2	2,0	135
3	2,2	210
4	2,3	260
5	0,8	320

Corrélation :

Le premier signal étudié est composé d'une seule fréquence. À la figure 28, partie centrale, on peut voir le signal global. Dans la partie du bas, il y a, en bleu, le signal de la source de référence et, en rouge, la section du signal qui a servi comme signal de

référence. Ici, comme le signal global est le même que le signal de la source de référence, la corrélation devient une auto corrélation. Les valeurs pondérées recherchées dans ce cas sont de 1, ce qui correspond aux valeurs obtenues dans la partie du haut. Il y a donc une bonne reconnaissance du signal de référence dans le signal global. Le signal de référence a une énergie de 41,6 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0 et 0,4 dB. Pour les 2^{ième} et 3^{ième} signaux, la reconnaissance donne d'aussi bons résultats, l'erreur se situant entre 0,1 et 0,5 dB.

Comme les signaux utilisés sont identiques au signal de référence, il fallait s'attendre à un bon niveau de reconnaissance. Les résultats obtenus vont dans ce sens.

Distribution temps-fréquence :

À la figure 29, on peut voir le signal global, sa distribution temps-fréquence et sa transformée de Fourier. Dans la partie du bas, il y a un tableau résumant les valeurs de l'estimé pour chaque impact. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées d'au plus 0,8 dB, selon les impacts. Pour les 2^{ième} et 3^{ième} signaux, la reconnaissance donne des résultats similaires, l'erreur se situant entre 0,2 et 1,2 dB.

Les résultats obtenus avec la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence sont moins précis que ceux obtenus en utilisant la corrélation mais ils demeurent néanmoins acceptables. Ce niveau d'erreur correspond probablement à la précision (1,2 dB signifie de 10 à 15% d'erreur) de ce genre de méthode de reconnaissance.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 30 montre la CWT d'un signal composé d'une source ayant 1 fréquence de rayonnement. La partie du haut montre le signal temporel, la partie centrale montre la CWT et, en dessous, l'énergie de CWT à chaque niveau de décomposition. Pour ce signal, les niveaux de décomposition 18 et 45 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal et sont l'équivalent du gabarit décrit dans la section traitant de la distribution temps-fréquence. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrés dans la partie du bas de la figure 30 ont été obtenus. L'erreur sur l'énergie de l'estimé varie entre 0,2 et 1,5 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 3 fréquences, l'erreur obtenue est du même ordre, soit entre 0,3 et 1,2 dB. Pour le 3^{ième} signal, celui ayant 5 fréquences, l'erreur augmente, passant à 2,1 dB.

En utilisant cette méthode de reconnaissance, l'erreur augmente significativement par rapport aux autres méthodes. Ce niveau d'erreur est décevant sachant que les signaux utilisés sont identiques à celui de référence. L'auteur a refait les calculs de reconnaissance en utilisant un niveau de décomposition supérieur sans obtenir de meilleur résultat. Ce niveau d'erreur correspond probablement à la précision (2,1 dB signifie de 20 à 25% d'erreur) de ce genre de méthode de reconnaissance.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 31. La partie du haut montre le signal temporel, la partie centrale montre l'arbre de décomposition du signal de référence et la partie du bas montre le tableau des résultats de la reconnaissance pour les 5 premiers impacts. Les erreurs

obtenues varient entre 0,1 et 2,5 dB. Pour les 2^{ième} et 3^{ième} signaux, la reconnaissance donne des résultats similaires, l'erreur se situant entre 1,0 et 2,6 dB.

En utilisant cette méthode de reconnaissance, l'erreur augmente significativement par rapport aux autres méthodes. Ce niveau d'erreur est décevant sachant que les signaux utilisés sont identiques à celui de référence. L'auteur a refait les calculs de reconnaissance en utilisant un niveau de décomposition supérieur sans obtenir de meilleur résultat. Ce niveau d'erreur correspond probablement à la précision (2,6 dB signifie de 25 à 30% d'erreur) de ce genre de méthode de reconnaissance.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 32 présente plusieurs courbes : le signal de référence (en haut à gauche), l'inverse de la réponse impulsionnelle (appelée h_i inverse, en haut à droite), le signal global (appelé signal d'entrée, au centre) et le peigne d'impulsions (courbe du bas). Les valeurs des impulsions cherchées dans ce cas sont voisines de 1, ce qui correspond aux valeurs obtenues. Il y a donc une bonne reconnaissance du signal de référence dans le signal global. Le signal de référence a une énergie de 41,6 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,1 et 0,4 dB. Pour les 2^{ième} et 3^{ième} signaux, la reconnaissance donne aussi de bons résultats, l'erreur se situant entre 0,1 et 0,5 dB.

Comme les signaux utilisés sont identiques au signal de référence, il fallait s'attendre à un bon niveau de reconnaissance. Les résultats obtenus vont dans ce sens.

Conclusion :

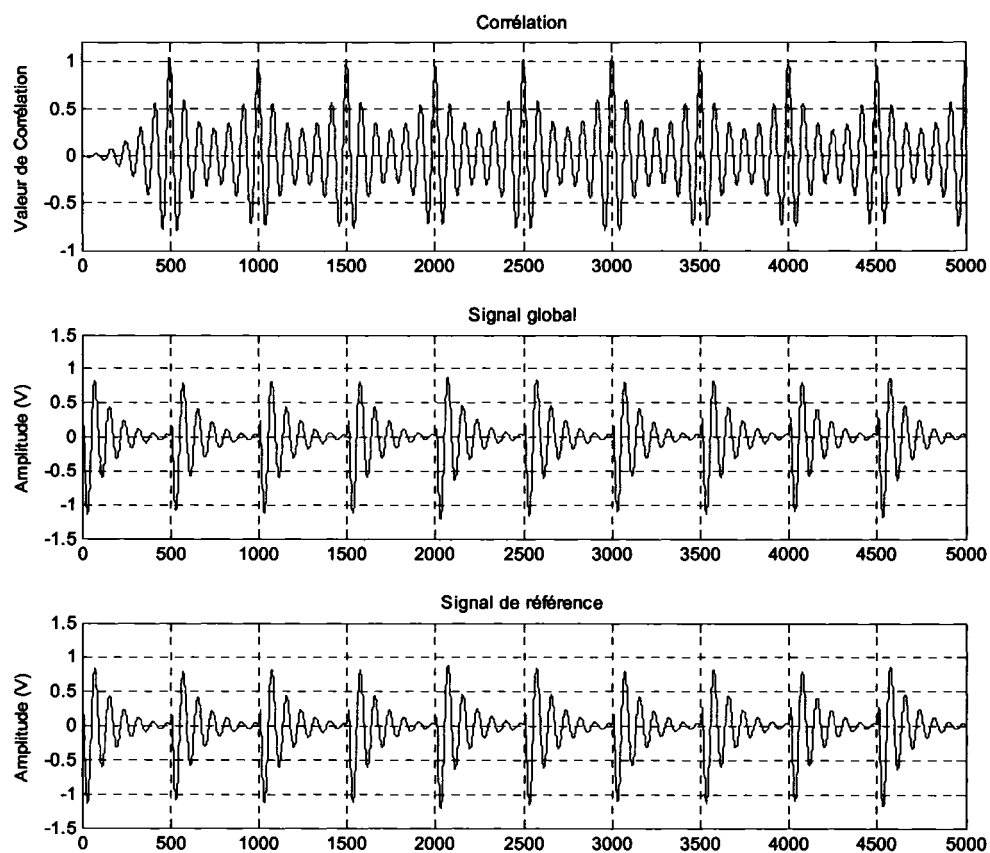
Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance vis à vis des signaux simples. En fait le signal global était le même que

le signal de référence. Dans ce cas-ci, il fallait s'attendre à de bons résultats de la part de toutes les méthodes de reconnaissance, ce qui n'a pas été le cas. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, 2 ont retenues l'attention en ayant des erreurs supérieures aux autres : la distribution continue d'ondelettes et la décomposition par ondelettes.

Tableau V

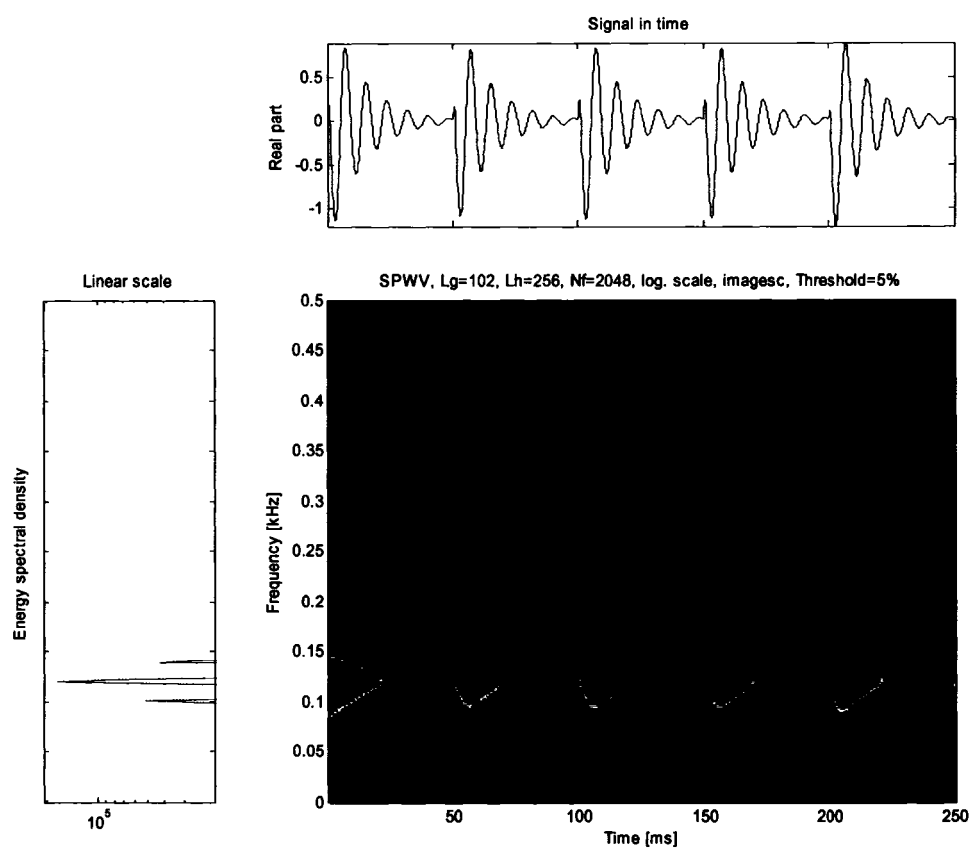
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec signaux contenant une source

Méthode	Erreur
Corrélation	0,0 à 0,5 dB
SWVD	0,2 à 1,2 dB
CWT	0,2 à 2,1 dB
Décomposition	0,1 à 2,6 dB
Filtrage temporel	0,1 à 0,5 dB



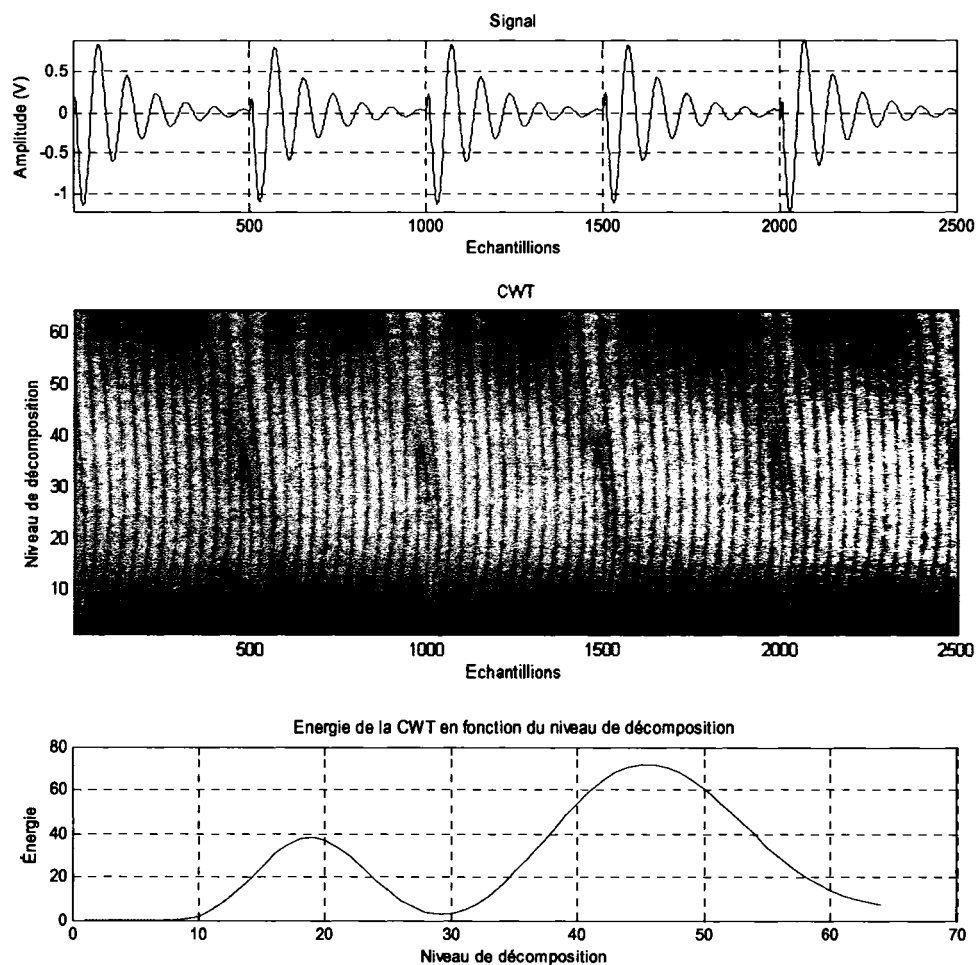
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,180	41,6 dB	43,0 dB	43,2 dB	0,2 dB
2	0,935	41,6 dB	41,0 dB	40,8 dB	0,2 dB
3	1,010	41,6 dB	41,6 dB	41,7 dB	0,0 dB
4	0,950	41,6 dB	41,3 dB	41,7 dB	0,4 dB
5	1,100	41,6 dB	42,4 dB	42,4 dB	0,0 dB

Figure 28 Résultats de corrélation d'un signal ayant 1 fréquence



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,170	41,6 dB	43,0 dB	43,2 dB	0,2 dB
2	1,000	41,6 dB	41,6 dB	40,8 dB	0,8 dB
3	0,940	41,6 dB	41,1 dB	41,7 dB	0,6 dB
4	1,111	41,6 dB	42,5 dB	41,7 dB	0,8 dB
5	1,207	41,6 dB	43,2 dB	42,4 dB	0,8 dB

Figure 29 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal ayant 1 fréquence



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,010	41,6 dB	41,7 dB	43,2 dB	1,5 dB
2	1,022	41,6 dB	41,8 dB	40,8 dB	1,0 dB
3	0,990	41,6 dB	41,5 dB	41,7 dB	0,2 dB
4	1,083	41,6 dB	42,3 dB	41,7 dB	0,6 dB
5	1,211	41,6 dB	43,3 dB	42,4 dB	0,9 dB

Figure 30 Résultats de la distribution CWT d'un signal ayant 1 fréquence

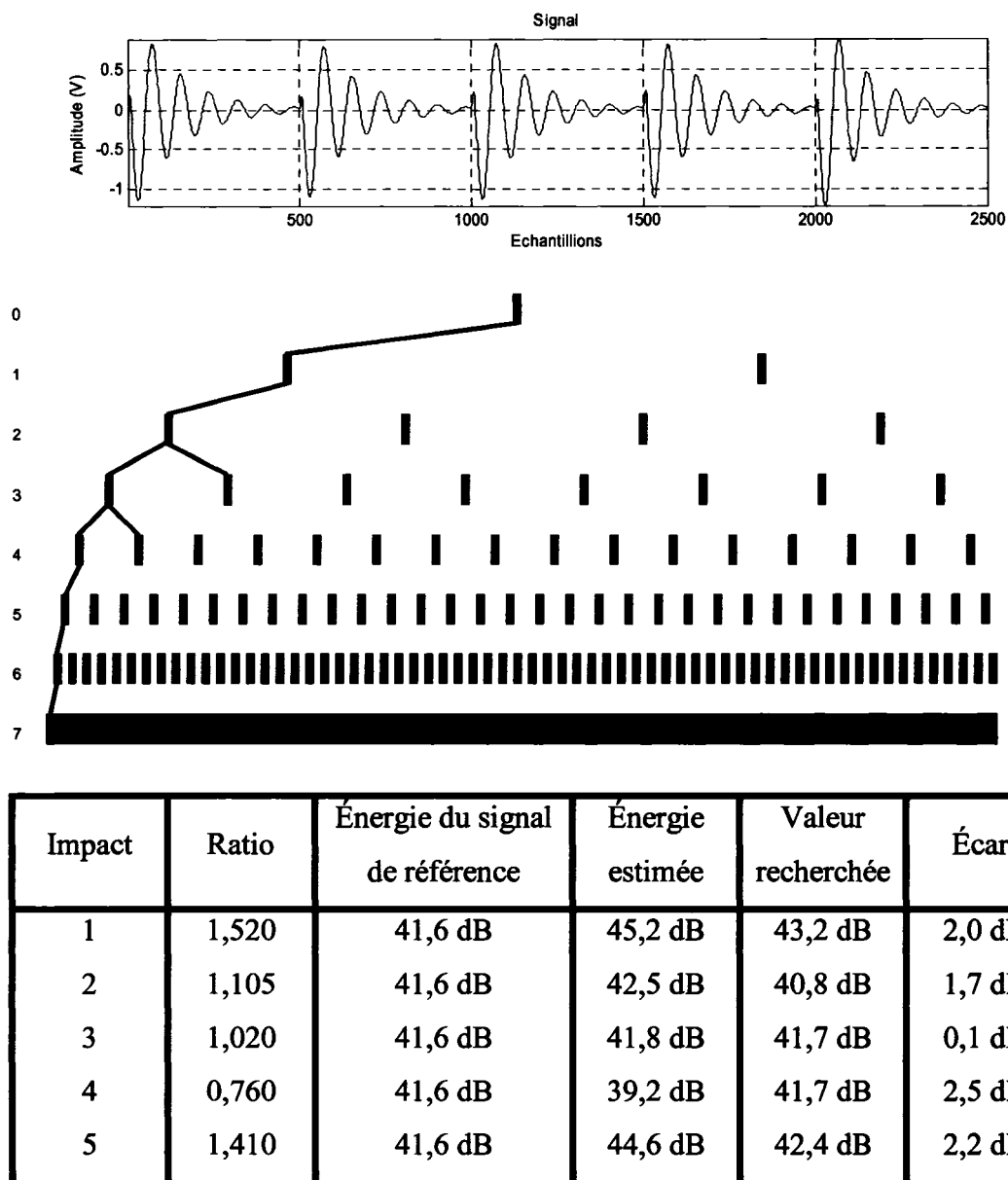
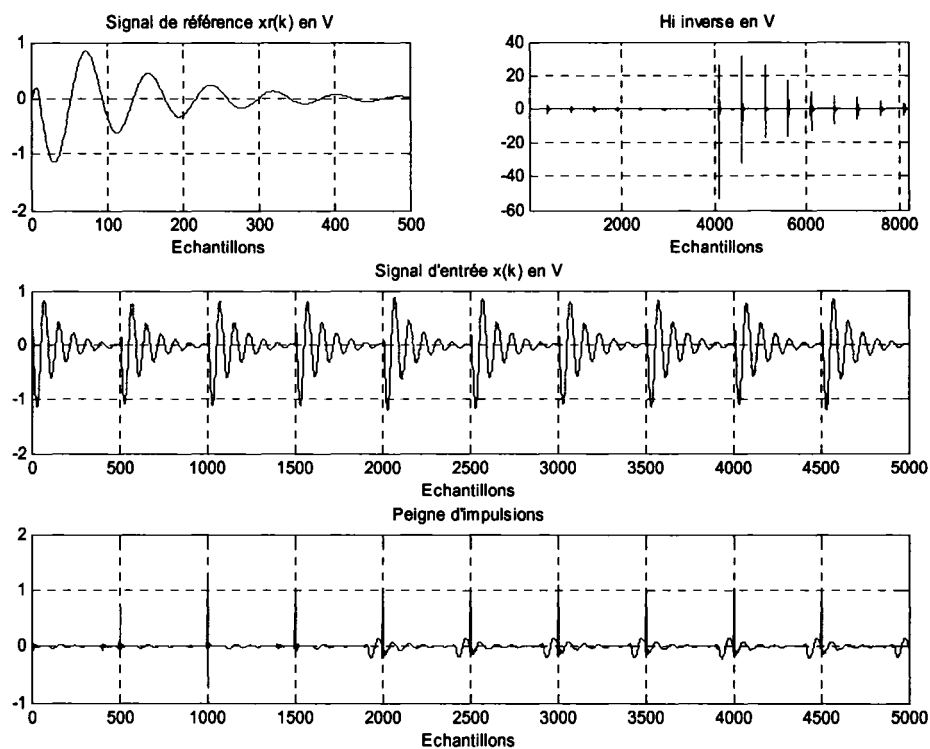


Figure 31 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal ayant 1 fréquence



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,150	41,6 dB	42,8 dB	43,2 dB	0,4 dB
2	0,902	41,6 dB	40,7 dB	40,8 dB	0,1 dB
3	1,035	41,6 dB	41,9 dB	41,7 dB	0,2 dB
4	1,050	41,6 dB	42,0 dB	41,7 dB	0,3 dB
5	1,109	41,6 dB	42,5 dB	42,4 dB	0,1 dB

Figure 32 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal ayant 1 fréquence

4.2.2.2 Étape 2 : multi sources

Pour cette étape, 2 signaux différents seront utilisés. Le premier signal sera composé de 2 sources ayant chacune une fréquence de rayonnement et le deuxième sera composé de 5 sources ayant chacune une fréquence de rayonnement. Les détails de leur composition sont les suivants :

Signal 1 (48,6 dB) :

Global				
Fréquence	Référence		Source 2	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100

Le 1^{er} signal étudié est composé de 2 sources ayant chacune 1 fréquence. Les 2 sources ne sont pas simultanées, il y a un retard de 300 échantillons de la source 2 par rapport à la source de référence.

Signal 2 (53,4 dB) :

	Global									
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123

Le 2^{ème} signal étudié est composé de 5 sources ayant chacune 1 fréquence. Les 5 sources ne sont pas simultanées, les source 2, 3, 4 et 5 sont en retard par rapport à la source de référence de respectivement 300, 250, 200 et 300 échantillons.

Corrélation :

La figure 33 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation dans le cas du signal 1. Les valeurs pondérées recherchées dans ce cas sont de 1, ce qui ne correspond pas aux valeurs obtenues dans la partie du haut. Cette méthode de reconnaissance ne parvient pas à faire une nette distinction entre les 2 sources. Des valeurs de corrélation autour de 1,7 sont obtenues aux endroits où la source de référence est maximale (aux échantillons multiples de 500). Entre ces multiples, la corrélation donne des valeurs près de 1, ce qui peut porter à croire que la source de référence possède une énergie importante, ce qui n'est pas le cas. La reconnaissance du signal de référence est donc plus difficile dans ce cas. Le signal de référence a une énergie de 41,6 dB et le signal global a une énergie de 48,6 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 2,7 et 4,3 dB. Pour le 2^{ième} signal, la reconnaissance à l'aide de la corrélation donne une plage d'erreur variant entre 2,0 et 4,3 dB.

Cette méthode de reconnaissance ne peut pas distinguer les sources entre elles. Avec le premier signal, malgré que les fréquences composant les 2 sources, 100 et 121 Hz, soient bien distinctes, la corrélation ne peut les distinguer. L'erreur de reconnaissance peut venir du fait de la présence de 2 sinusoides simples décroissantes : la corrélation entre 2 sinusoides de fréquences distinctes donne des valeurs non nulles. La même erreur se produit avec le 2^{ième} signal. Ce type d'erreur est inacceptable pour une méthode de reconnaissance. La prochaine étape de validation, où le contenu fréquentiel des sources sera plus riche, permettra de voir si la corrélation a un potentiel de reconnaissance réel.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville :

La figure 34 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. La SWVD permet à peine de distinguer les 2 impacts, le premier étant autour des multiples de 50ms et le second, un peu avant. La reconnaissance est meilleure que celle avec la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées de 0,4 à 1,2 dB, selon les impacts. Pour le 2^{ème} signal, l'erreur dans la reconnaissance est du même ordre, soit entre 0,4 et 1,1 dB.

Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux obtenus avec la corrélation. L'erreur de reconnaissance demeure dans zone très acceptable, soit de moins de 15%. Contrairement à la corrélation, la distribution temps-fréquence permet de distinguer les différentes sources si leur contenu fréquentiel est distinct.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 35 montre la CWT du 1^{er} signal. Sur la CWT, les 2 sources d'impact sont identifiables, à l'échantillon 300 pour la seconde source et à l'échantillon 500 pour la première source. Pour ce signal, les niveaux de décomposition 23 et 64 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent une erreur sur l'énergie de l'estimé variant entre 0,8 et 2,1 dB. Pour le 2^{ème} signal, l'erreur dans la reconnaissance augmente, passant de 0,8 à 3,5 dB.

Dans ce cas, l'erreur de reconnaissance vient de la similitude dans la décomposition du signal des différentes sources. En effet, la distribution continue d'ondelettes de la

source de référence est similaire à celle de la 2^{ième} source. Cette méthode de reconnaissance ne permet donc pas de distinguer 2 sources similaires.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 36. Les erreurs obtenues avec cette méthode de reconnaissance varient entre 0,5 et 3,2 dB. Pour le 2^{ième} signal, la reconnaissance donne des résultats similaires, l'erreur se situant entre 0,8 et 3,9 dB.

Dans ce cas, l'erreur de reconnaissance vient également de la similitude dans la décomposition du signal des différentes sources. En effet, l'arbre de décomposition de la source de référence est similaire à celui de la 2^{ième} source. Cette méthode de reconnaissance ne permet donc pas de distinguer 2 sources similaires.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 37 montre les résultats de l'identification à l'aide du filtrage temporel. Les valeurs d'impulsions cherchées dans ce cas sont de 1, ce qui correspond aux valeurs obtenues dans la partie du bas. Cette méthode de reconnaissance parvient à faire une nette distinction entre les 2 sources. Des valeurs d'impulsion voisines de 1,0 sont obtenues aux endroits où la source de référence est maximale (aux échantillons multiples de 500). Le signal de référence a une énergie de 41,6 dB et le signal global a une énergie de 48,6 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,0 et 0,3 dB. Pour le 2^{ième} signal, la reconnaissance à l'aide du filtrage temporel donne une plage d'erreur variant entre 0,2 et 0,6 dB.

Cette méthode de reconnaissance peut distinguer les sources entre elles.

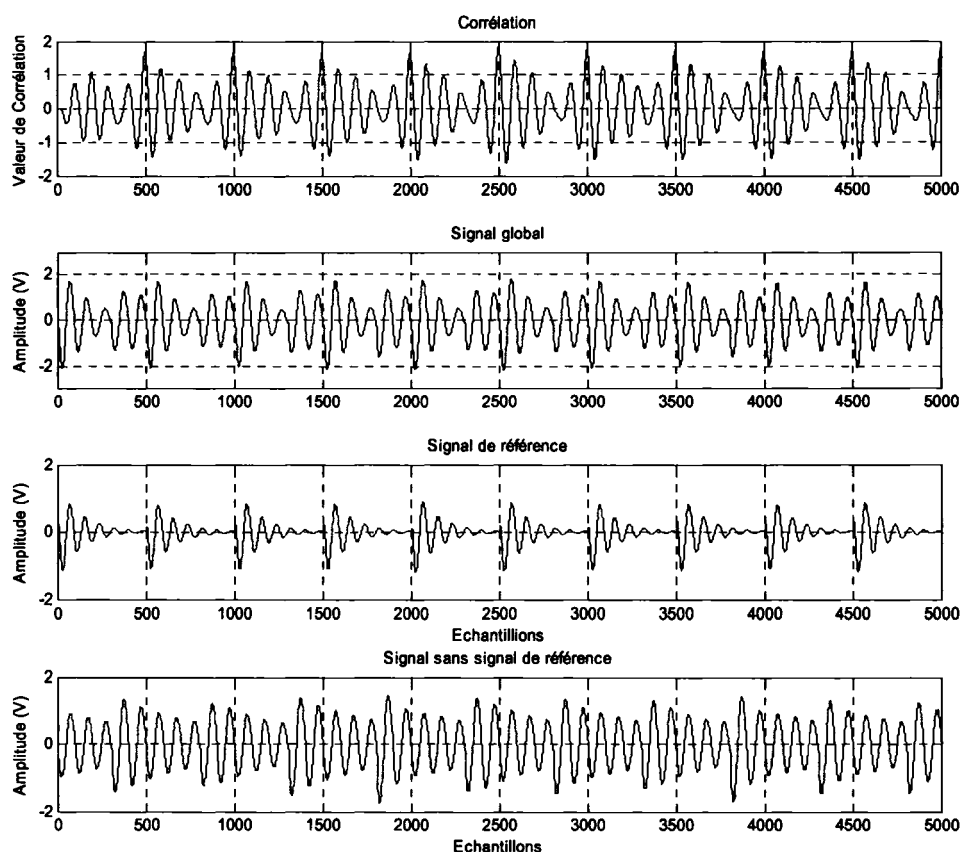
Conclusion :

Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance en présence d'autres sources. Les résultats attendus dans ce cas auraient du être bons parce que les différentes sources étaient composées de seulement une fréquence de rayonnement. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, la méthode utilisant un filtrage temporel a démontré les meilleures aptitudes. La corrélation a montré des résultats décevants mais attendu avec le genre de signaux utilisés. Les méthodes utilisant les ondelettes ont démontré de sérieuses lacunes, surtout à cause de la similitude entre les décompositions des sources.

Tableau VI

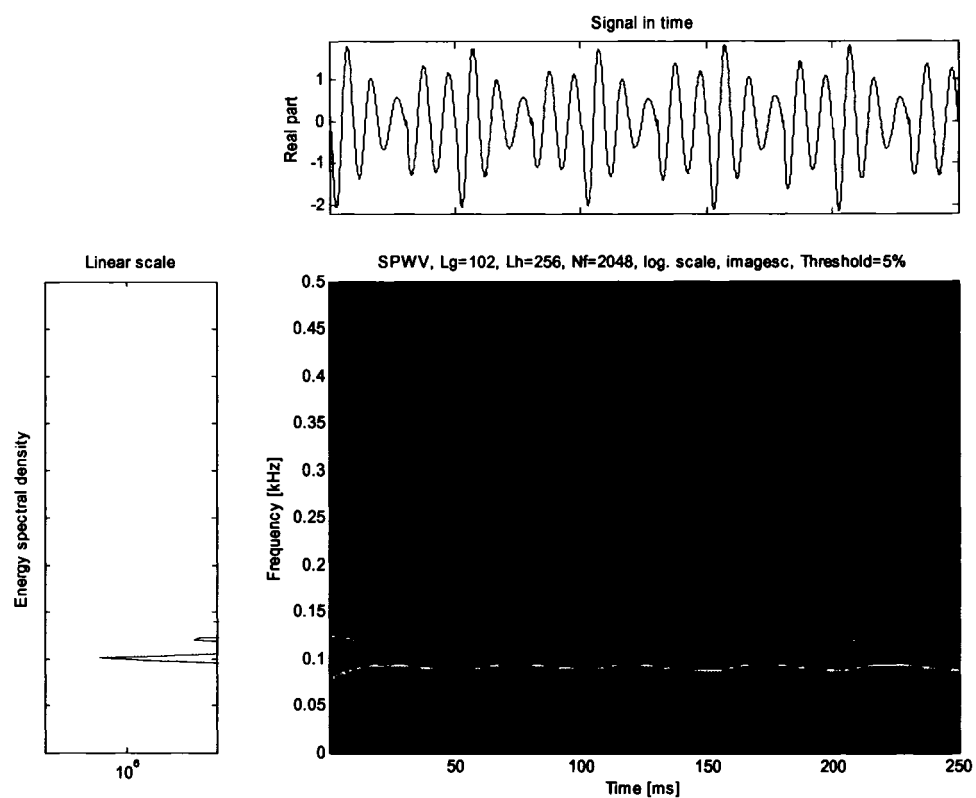
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal contenant plusieurs sources ayant chacune une fréquence de rayonnement

Méthode	Erreur
Corrélation	2,0 à 4,3 dB
SWVD	0,4 à 1,2 dB
CWT	0,8 à 3,5 dB
Décomposition	0,5 à 3,9 dB
Filtrage temporel	0,0 à 0,6 dB



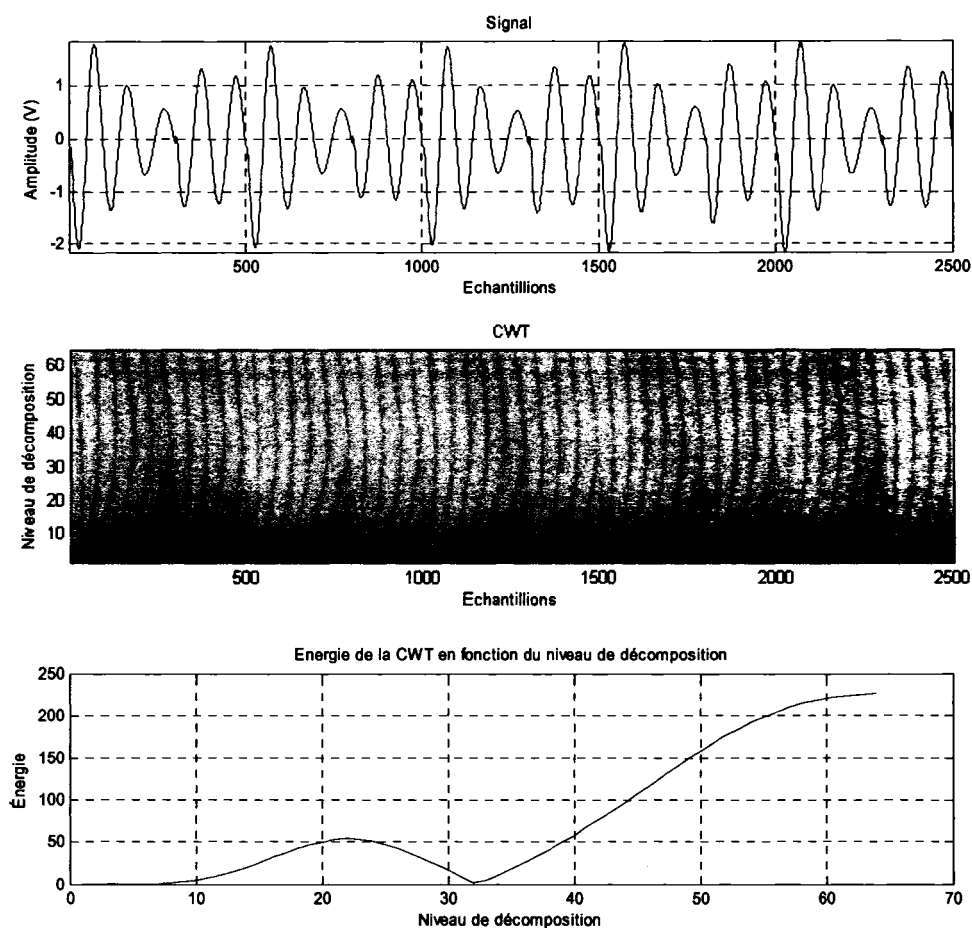
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,700	41,6 dB	46,2 dB	43,2 dB	3,0 dB
2	1,480	41,6 dB	45,0 dB	40,8 dB	4,2 dB
3	1,500	41,6 dB	45,1 dB	41,7 dB	3,4 dB
4	1,380	41,6 dB	44,4 dB	41,7 dB	2,7 dB
5	1,805	41,6 dB	46,7 dB	42,4 dB	4,3 dB

Figure 33 Résultats de corrélation d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,380	41,6 dB	44,4 dB	43,2 dB	1,2 dB
2	1,000	41,6 dB	41,6 dB	40,8 dB	0,8 dB
3	0,890	41,6 dB	40,6 dB	41,7 dB	1,1 dB
4	0,965	41,6 dB	41,3 dB	41,7 dB	0,4 dB
5	1,890	41,6 dB	43,1 dB	42,4 dB	0,7 dB

Figure 34 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,025	41,6 dB	41,8 dB	43,2 dB	1,4 dB
2	1,060	41,6 dB	42,1 dB	40,8 dB	1,3 dB
3	0,805	41,6 dB	39,6 dB	41,7 dB	2,1 dB
4	1,110	41,6 dB	42,5 dB	41,7 dB	0,8 dB
5	1,350	41,6 dB	44,2 dB	42,4 dB	1,8 dB

Figure 35 Résultats de la distribution CWT d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence

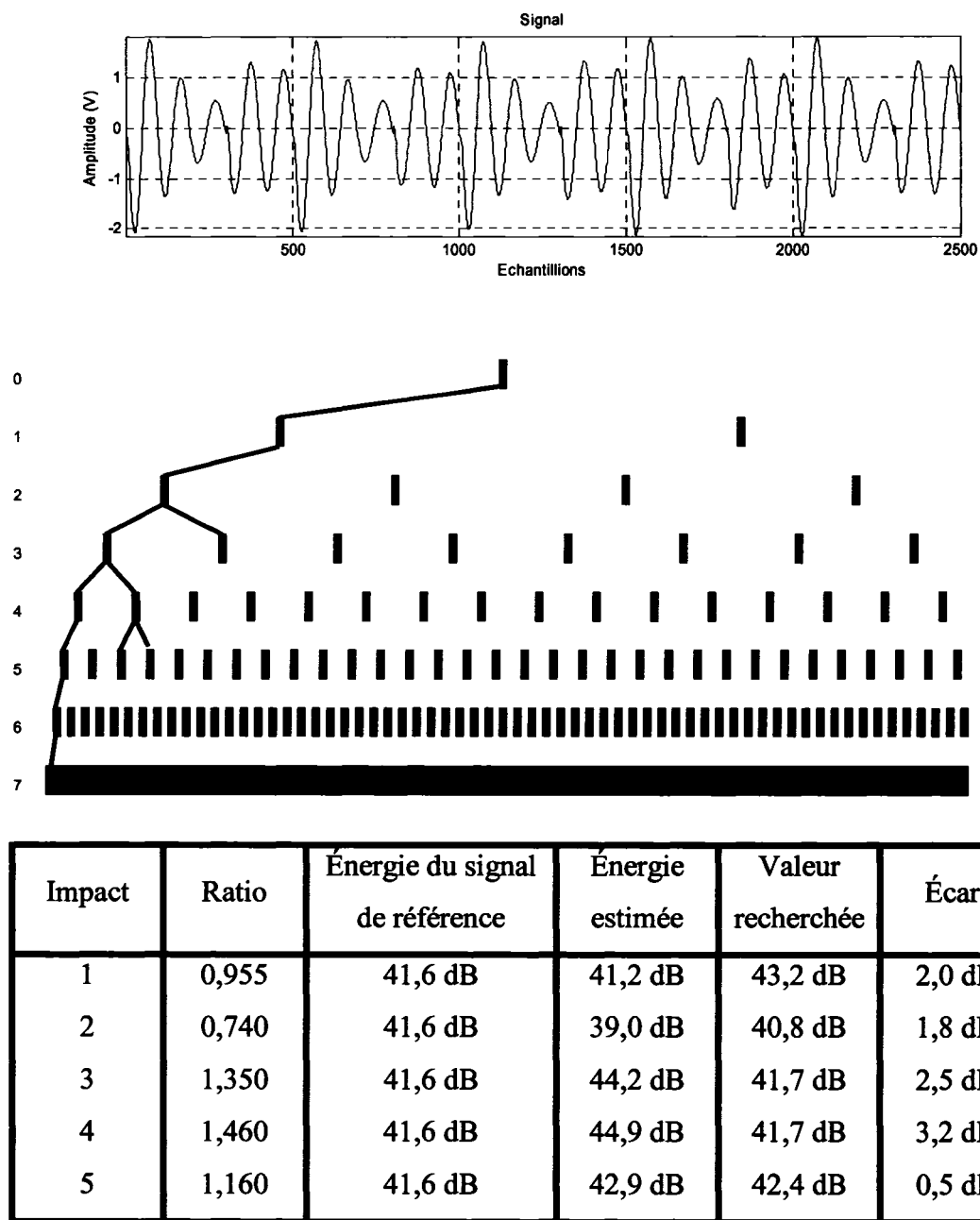
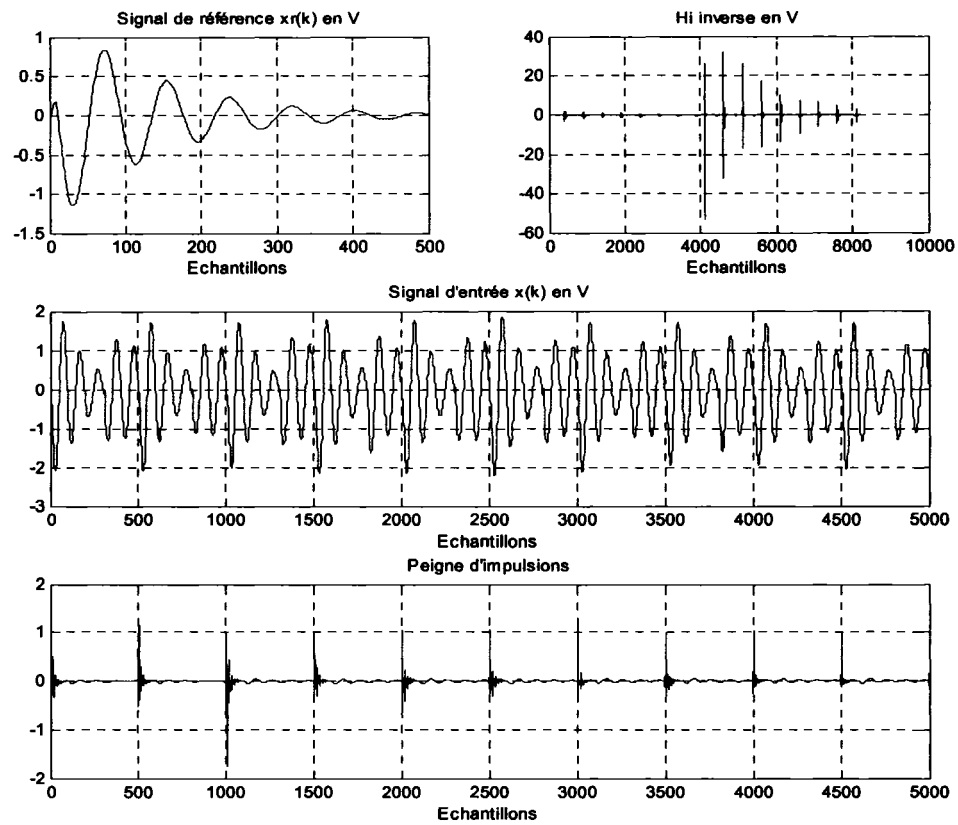


Figure 36 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,150	41,6 dB	42,9 dB	43,2 dB	0,3 dB
2	0,900	41,6 dB	40,7 dB	40,8 dB	0,1 dB
3	1,010	41,6 dB	41,7 dB	41,7 dB	0,0 dB
4	1,010	41,6 dB	41,7 dB	41,7 dB	0,0 dB
5	1,125	41,6 dB	42,6 dB	42,4 dB	0,2 dB

Figure 37 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal ayant 2 sources d'une fréquence

4.2.2.3 Étape 3 : multi sources, multi fréquences

Pour cette étape, 2 signaux différents seront utilisés. Le premier signal sera composé de 3 sources ayant chacune 3 fréquences de rayonnement et le deuxième sera composé de 5 sources ayant chacune 5 fréquences de rayonnement. Les détails de leur composition sont les suivants :

Signal 1 (56,6 dB) :

Global						
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105

Le 1^{er} signal étudié est composé de 3 sources ayant chacune 1 fréquence. Les 3 sources ne sont pas simultanées, les source 2 et 3 sont en retard par rapport à la source de référence de respectivement 300 et 250 échantillons.

Signal 2 (59,8 dB) :

Global										
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78	2,0	163	1,4	168
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105	1,5	184	1,0	241
4	2,3	260	1,7	400	1,5	125	1,6	254	0,8	306
5	0,8	320	2,4	500	1,6	160	1,3	268	0,9	405

Le 2^{ème} signal étudié est composé de 5 sources ayant chacune 1 fréquence. Les 5 sources ne sont pas simultanées, les source 2, 3, 4 et 5 sont en retard par rapport à la source de référence de respectivement 300, 250, 200 et 300 échantillons.

Corrélation :

La figure 38 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation pour le 1^{er} signal. Les valeurs pondérées recherchées dans ce cas sont de 1, ce qui se rapproche des valeurs obtenues dans la partie du haut. Contrairement aux cas où les sources ont une seule fréquence de rayonnement, ce cas-ci, avec 3 fréquences de rayonnement, rend le signal de référence plus distinctif des autres sources. Par contre, il faut faire attention au niveau de corrélation entre les maxima. Ces niveaux peuvent avoir des valeurs élevées et entraîner une confusion lors de la reconnaissance. Le signal de référence a une énergie de 54,1 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,4 et 1,3 dB. Pour le 2^{ème} signal, l'erreur de reconnaissance varie entre 0,1 et 0,8 dB.

L'ajout de fréquences supplémentaires dans le contenu fréquentiel des sources aide à la reconnaissance de la source de référence. La trace temporelle du signal de référence semble être suffisamment distincte pour pouvoir la distinguer à l'aide de cette méthode.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville :

La figure 39 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. La SWVD permet à peine de distinguer les impacts des différentes sources, le premier étant autour des multiples de 50ms et le second, un peu avant. La reconnaissance est similaire à celle avec la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées de 0,4 à 1,5 dB, selon les impacts. Pour le 2^{ème} signal, l'erreur se situe entre 0,2 et 1,0 dB.

Les résultats sont du même ordre que ceux obtenus avec des sources ayant une seule fréquence. Cette méthode de reconnaissance permet donc de distinguer la source de référence parmi les autres sources.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 40 montre la CWT d'un signal composé de 3 sources ayant 3 fréquences de rayonnement. Sur la CWT, les impacts des sources sont identifiables, à l'échantillon 300 pour le second groupe d'impact et à l'échantillon 500 pour le premier groupe d'impact (qui est la source de référence). Pour ce signal, les niveaux de décomposition 20 et 57 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent une erreur sur l'énergie de l'estimé

variant entre 1,2 et 3,4 dB. Pour le 2^{ième} signal, l'erreur dans la reconnaissance varie entre 1,5 et 3,3 dB.

Malgré l'ajout de fréquences dans le contenu fréquentiel, cette méthode ne peut reconnaître la source de référence adéquatement. Probablement que les CWT n'étaient pas assez distinctes les unes des autres.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 41. Les erreurs obtenues avec cette méthode de reconnaissance varient entre 1,5 et 3,8 dB. Pour le 2^{ième} signal, la reconnaissance donne un niveau d'erreur variant entre 2,4 et 4,1 dB.

Le niveau d'erreur atteint est élevé, il s'agit d'une erreur de presque 50%. Cette méthode de reconnaissance ne semble pas adéquate pour la reconnaissance de ce type de signal de référence.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 42 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide du filtrage temporel des signaux. Les valeurs pondérées recherchées dans ce cas sont de 1, ce qui se rapproche des valeurs obtenues dans la partie du bas. Par contre, il faut faire attention au niveau des impulsions entre les maxima, ceux-ci sont plus élevés dans ce cas-ci. Ces niveaux peuvent avoir des valeurs élevées et entraîner une confusion lors de la reconnaissance. Le signal de référence a une énergie de 54,1 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,0 et 1,0 dB. Pour le 2^{ième} signal, l'erreur de reconnaissance varie entre 0,1 et 1,5 dB.

L'ajout de fréquences supplémentaires dans le contenu fréquentiel des sources n'a pas nuit à la reconnaissance de la source de référence. Le contenu spectral du signal de référence semble être suffisamment distinct pour pouvoir la distinguer à l'aide de cette méthode.

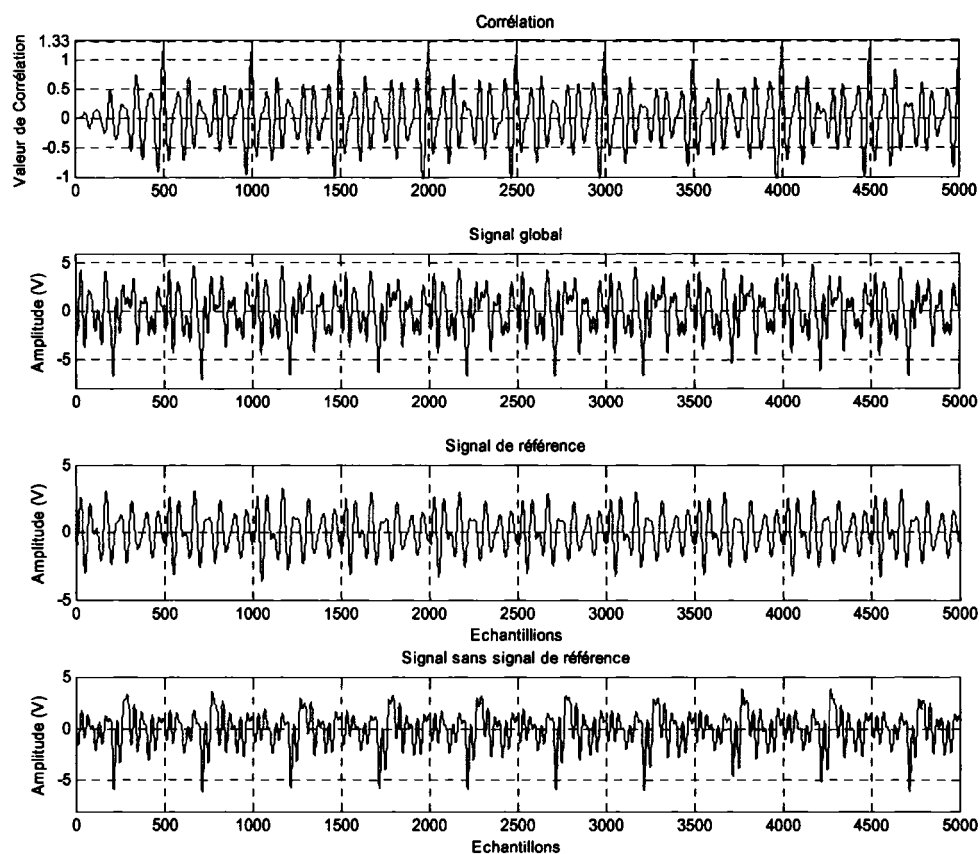
Conclusion :

Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance en présence de plusieurs autres sources. Les résultats cette section sont meilleurs que ceux des sections précédentes pour la corrélation, principalement à cause de la particularité de la forme du signal temporel de la source de référence. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, la méthode utilisant un filtrage temporel a encore démontré d'excellentes aptitudes. À ce stade des validations, il semble évident que les méthodes de reconnaissance utilisant les ondelettes ne sont pas adéquates. Leurs performances ne sont pas comparables aux autres méthodes pour ce type d'application. Pour les étapes suivantes, elles seront quand même utilisées mais leurs lacunes se feront plus prononcées.

Tableau VII

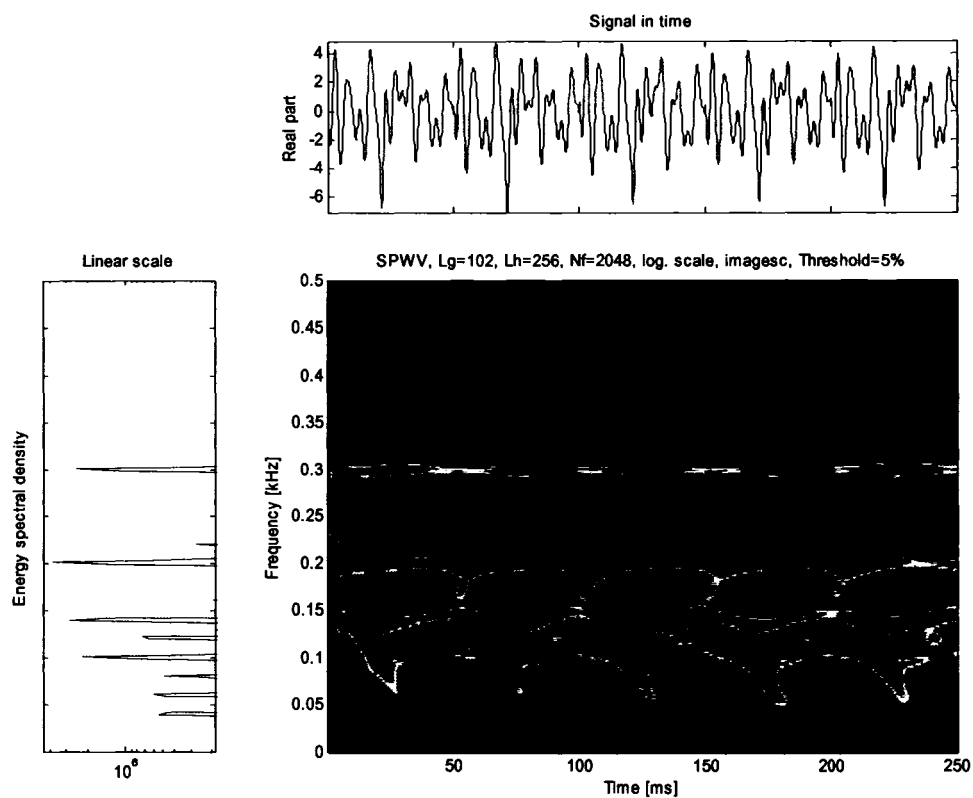
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal ayant plusieurs sources composées de plusieurs fréquences de rayonnement

Méthode	Erreur
Corrélation	0,1 à 1,3 dB
SWVD	0,2 à 1,5 dB
CWT	1,2 à 3,4 dB
Décomposition	1,5 à 4,1 dB
Filtrage Temporel	0,0 à 1,5 dB



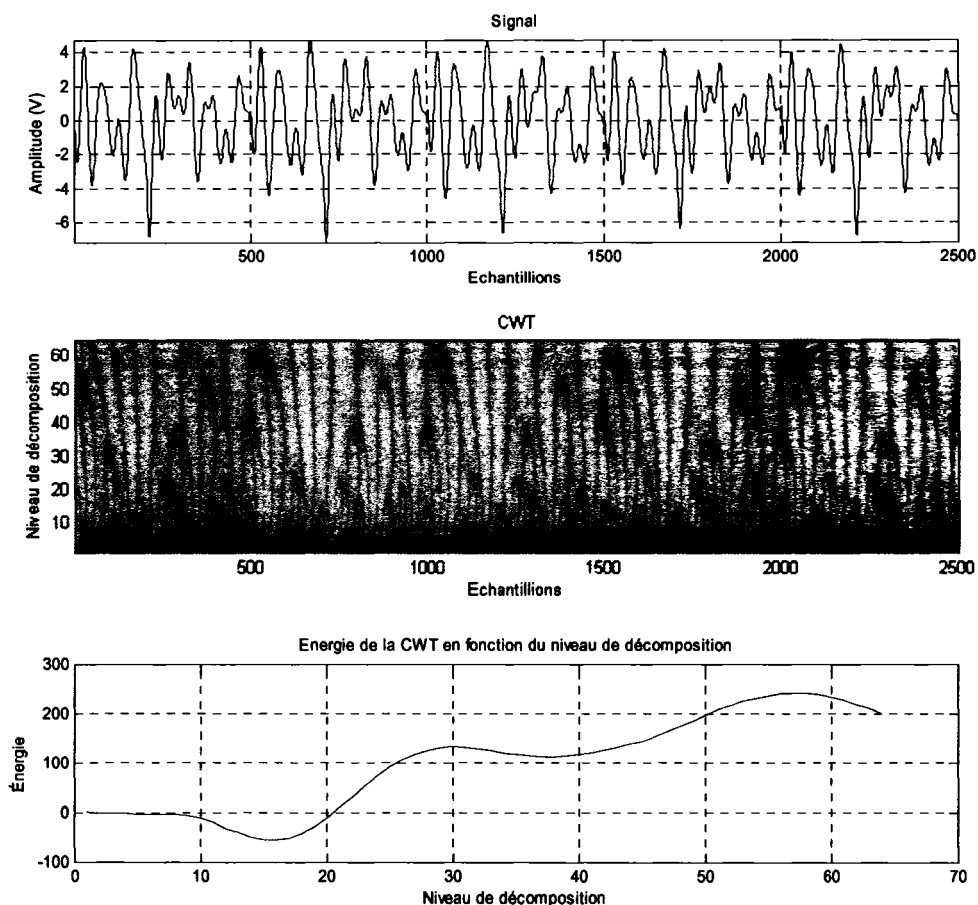
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,175	54,1 dB	55,5 dB	55,1 dB	0,4 dB
2	1,135	54,1 dB	55,2 dB	54,7 dB	0,5 dB
3	1,085	54,1 dB	54,8 dB	53,7 dB	1,1 dB
4	1,110	54,1 dB	55,0 dB	53,7 dB	1,3 dB
5	1,110	54,1 dB	55,0 dB	54,4 dB	0,6 dB

Figure 38 Résultats de corrélation d'un signal de 3 sources de 3 fréquences



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,320	54,1 dB	56,5 dB	55,1 dB	1,4 dB
2	1,135	54,1 dB	55,2 dB	54,7 dB	0,5 dB
3	0,910	54,1 dB	53,3 dB	53,7 dB	0,4 dB
4	0,840	54,1 dB	52,6 dB	53,7 dB	1,1 dB
5	1,230	54,1 dB	55,9 dB	54,4 dB	1,5 dB

Figure 39 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 3 sources de 3 fréquences



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,290	54,1 dB	56,3 dB	55,1 dB	1,2 dB
2	1,230	54,1 dB	55,9 dB	54,7 dB	1,2 dB
3	0,805	54,1 dB	52,2 dB	53,7 dB	1,5 dB
4	1,415	54,1 dB	57,1 dB	53,7 dB	3,4 dB
5	1,350	54,1 dB	56,7 dB	54,4 dB	2,3 dB

Figure 40 Résultats de la distribution CWT d'un signal de 3 sources de 3 fréquences

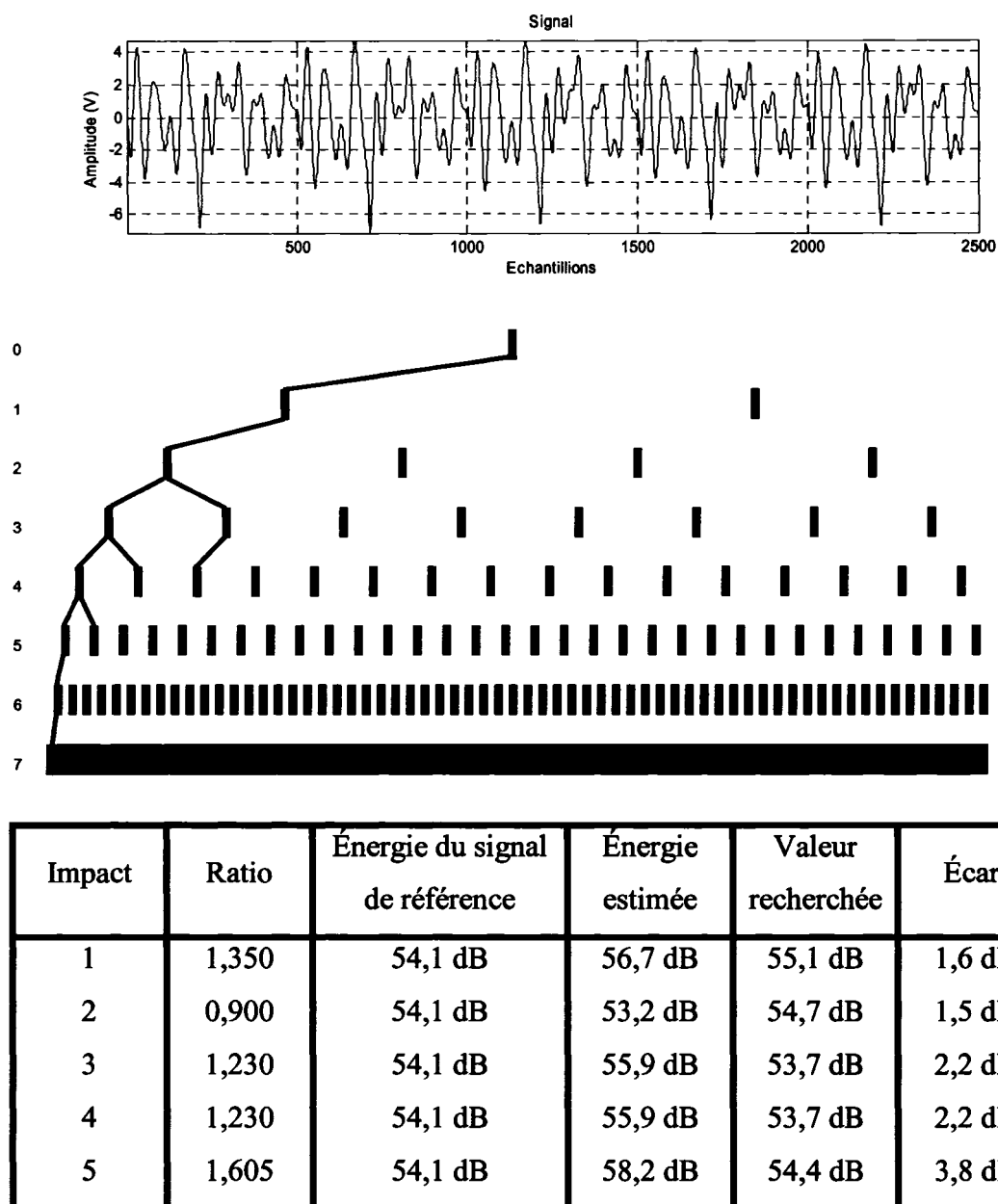
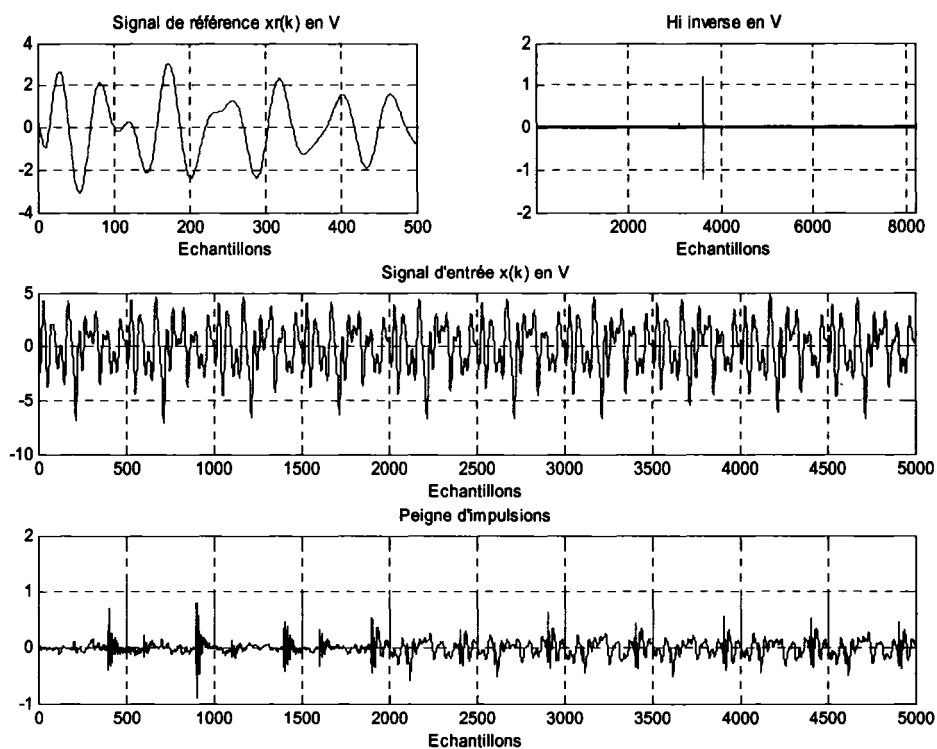


Figure 41 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 3 sources de 3 fréquences



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,085	54,1 dB	54,8 dB	55,1 dB	0,3 dB
2	0,955	54,1 dB	53,7 dB	54,7 dB	1,0 dB
3	0,990	54,1 dB	54,0 dB	53,7 dB	0,3 dB
4	0,950	54,1 dB	53,7 dB	53,7 dB	0,0 dB
5	1,075	54,1 dB	54,7 dB	54,4 dB	0,3 dB

Figure 42 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 3 sources de 3 fréquences

4.2.2.4 Étape 4 : multi sources, impacts simultanés

Pour cette étape, 4 signaux différents seront utilisés. Les deux premiers auront 2 ou 5 sources, avec une seule fréquence de rayonnement, mais dont les impacts se font au même moment. Les 2 autres signaux auront 3 ou 5 sources, avec plusieurs fréquences de rayonnement, et des impacts simultanés. Les détails de leur composition sont les suivants :

Signal 1 (50,6 dB) :

Global				
Fréquence	Référence		Source 2	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100

Signal 2 (55,4 dB) :

	Global									
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123

Signal 3 (56,6 dB) :

Global						
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105

Signal 4 (59,8 dB) :

	Global									
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78	2,0	163	1,4	168
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105	1,5	184	1,0	241
4	2,3	260	1,7	400	1,5	125	1,6	254	0,8	306
5	0,8	320	2,4	500	1,6	160	1,3	268	0,9	405

Corrélation :

Le 1er signal étudié est composé de 2 sources ayant chacune 1 fréquence. La figure 43 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation. Pour ce signal, les 2 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont encore de

1, ce qui ne correspond pas aux valeurs obtenues dans la partie du haut. En fait, les valeurs de corrélation maximales obtenues sont voisines de 2. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance ne peut faire la distinction entre les 2 sources. Le signal de référence a une énergie de 41,6 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 4,7 et 6,6 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées d'une fréquence, l'erreur obtenue varie entre 7,4 et 9,1 dB. À la lumière de ces résultats, il est évident que cette méthode ne peut adéquatement distinguer des sinusoïdes décroissantes les une des autres, surtout à cause de la ressemblance entre les attaques (partie du signal temporel au moment de l'impact) des différentes sources.

Pour le 3^{ième} signal, 3 sources composées de 3 fréquences, les résultats sont nettement meilleur avec une erreur variant entre 1,2 et 2,4 dB. L'erreur varie entre 1,9 et 2,7 dB avec 5 sources. Comme précédemment, lorsque le signal de référence a un contenu fréquentiel plus riche, la reconnaissance peut se faire avec un niveau d'erreur acceptable. Dans ce cas-ci, à cause du contenu fréquentiel plus riche, les attaques des signaux ne sont pas les seuls zones où il y a de l'énergie donc les valeurs de corrélation sont moins dépendantes des dites attaques.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville :

La figure 44 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées de 2,8 à 4,7 dB, selon les impacts. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées d'une fréquence, l'erreur obtenue varie entre 3,1 et 4,6 dB. À la lumière de ces résultats, il est évident que cette méthode ne peut adéquatement distinguer des sinusoïdes décroissantes les une des autres.

Pour le 3^{ième} signal, 3 sources composées de 3 fréquences, les résultats sont nettement meilleur avec une erreur variant entre 1,4 et 2,2 dB. L'erreur varie entre 2,0 et 3,1 dB avec 5 sources. Comme précédemment, lorsque le signal de référence a un contenu fréquentiel plus riche, la reconnaissance peut se faire avec un niveau d'erreur acceptable.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 45 montre la CWT d'un signal composé de 2 sources ayant une fréquence de rayonnement. Pour ce signal, les niveaux de décomposition 6 et 62 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent une erreur sur l'énergie de l'estimé variant entre 4,5 et 6,1 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées d'une fréquence, l'erreur obtenue varie entre 4,7 et 5,8 dB. À la lumière de ces résultats, il est évident que cette méthode ne peut adéquatement distinguer des sinusoides décroissantes les une des autres.

Pour le 3^{ième} signal, 3 sources composées de 3 fréquences, les résultats ne sont pas meilleur avec une erreur variant entre 3,7 et 5,0 dB. L'erreur varie entre 3,3 et 5,2 dB avec 5 sources. Ces 4 derniers résultats viennent appuyer la conclusion précédente concernant l'incapacité de la CWT à distinguer la source de référence en présence d'autres sources.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 46. Les erreurs obtenues avec cette méthode de reconnaissance varient entre 4,2 et 5,8 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées d'une

fréquence, l'erreur obtenue varie entre 3,7 et 5,2 dB. À la lumière de ces résultats, il est évident que cette méthode ne peut adéquatement distinguer des sinusoïdes décroissantes les une des autres.

Pour le 3^{ième} signal, 3 sources composées de 3 fréquences, les résultats ne sont pas meilleur avec une erreur variant entre 3,0 et 5,3 dB. L'erreur varie entre 3,7 et 6,1 dB avec 5 sources. Ces 4 derniers résultats viennent appuyer la conclusion précédente concernant l'incapacité de la décomposition par ondelettes à distinguer la source de référence en présence d'autres sources.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 47 montre les résultats de l'identification à l'aide du filtrage temporel. Pour ce signal, les 2 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont encore de 1, ce qui correspond aux valeurs obtenues avec le peigne d'impulsion. En fait, les valeurs des impulsions obtenues sont toutes voisines de 1. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance peut faire la distinction entre les 2 sources. Le signal de référence a une énergie de 41,6 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,0 et 0,6 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées d'une fréquence, l'erreur obtenue varie entre 0,4 et 1,1 dB. À la lumière de ces résultats, il est évident que cette méthode peut adéquatement distinguer des sinusoïdes décroissantes les une des autres.

Pour le 3^{ième} signal, 3 sources composées de 3 fréquences, les résultats sont similaires avec une erreur variant entre 0,4 et 1,4 dB. L'erreur varie entre 0,5 et 1,5 dB avec 5 sources.

Conclusion :

Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance vis à vis des signaux composés de plusieurs sources ayant des impacts simultanés. Les résultats auraient du être relativement bon, à tout le moins avec les 2 premiers signaux, vu la simplicité de ces signaux mais ça n'a pas été le cas. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, la méthode utilisant le filtrage temporel a démontré les meilleures aptitudes. La similitude entre le contenu fréquentiel des sources et le fait que les impacts soient simultanés expliquent, en partie, les piètres résultats de la corrélation et de la distribution temps-fréquence. La distribution continue d'ondelettes et la décomposition par ondelettes ont eu de piètres résultats. À la lumière de ces résultats, il est d'ores et déjà possible de conclure que :

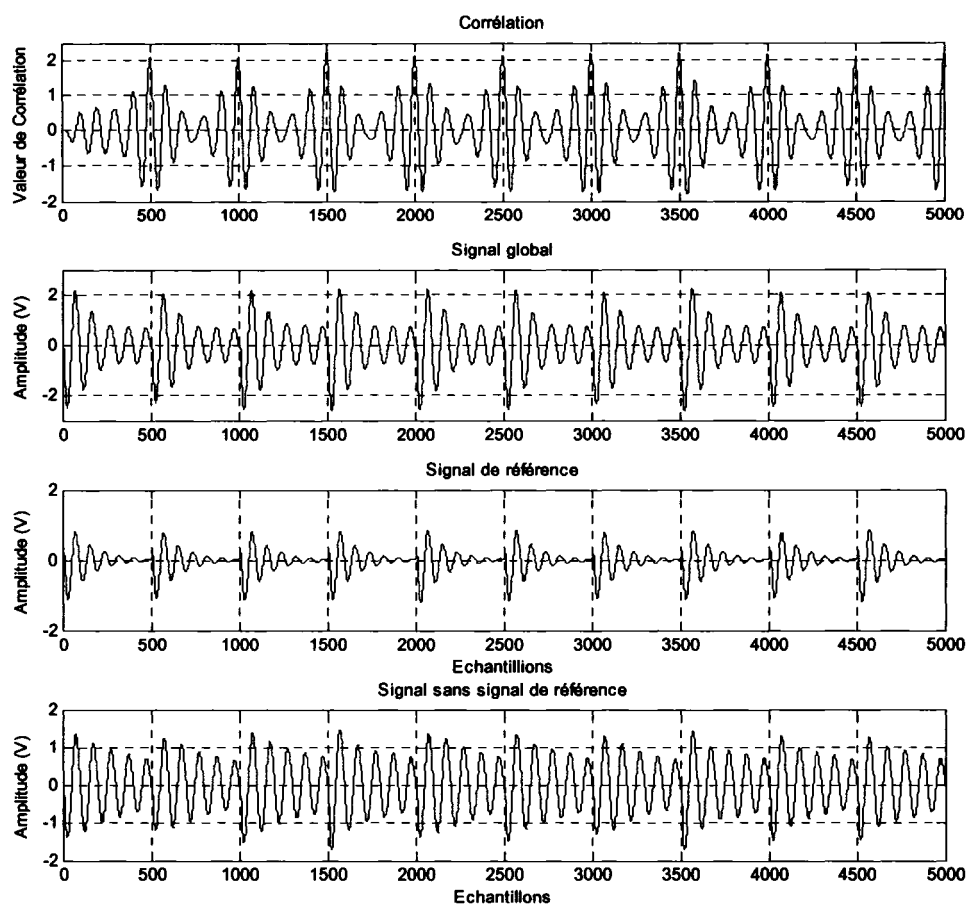
- La corrélation ne pourra, de façon appropriée, servir de méthode de reconnaissance. Elle ne permet pas de distinguer des sinusoïdes décroissantes entre elles. Elle surestime l'énergie de la source de référence si les impacts des sources sont simultanés.
- La distribution temps-fréquence Wigner-Ville ne pourra servir de méthode de reconnaissance. Elle surestime l'énergie de la source de référence si, dans la distribution temps-fréquence, il y a des zones de superposition d'énergie.
- Les méthodes utilisant les ondelettes ne pourront servir de méthode de reconnaissance. Les erreurs générées en les utilisant sont beaucoup trop élevées. Il est évident que l'environnement dans lequel nous désirons les utiliser ne leur convient pas.
- La méthode utilisant le filtrage temporel est la seule qui semble prometteuse. Elle a été capable de reconnaître le signal de référence dans tous les signaux utilisés, et cela avec une marge d'erreur faible.

Toutes les méthodes seront quand même évaluées pour la suite des validations afin d'appuyer ces conclusions.

Tableau XIII

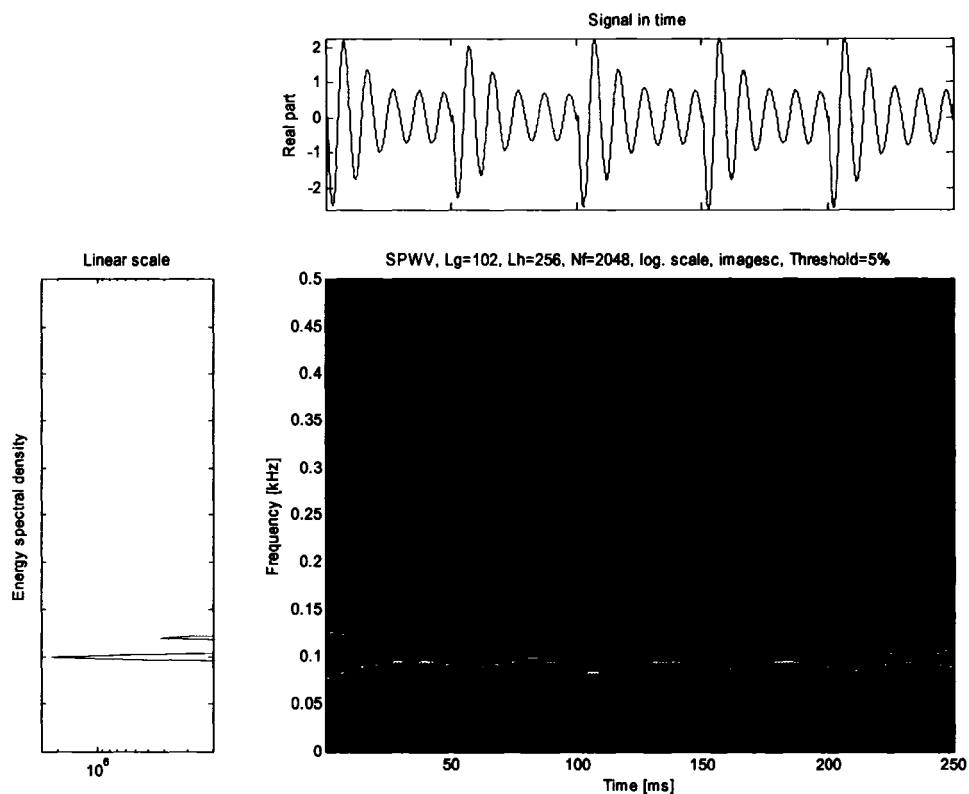
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de plusieurs sources ayant des impacts simultanés

Méthode	Erreur (fréquence unique)	Erreur (fréquences multiples)
Corrélation	4,7 à 9,1 dB	1,2 à 2,7 dB
SWVD	2,8 à 4,7 dB	1,4 à 3,1 dB
CWT	4,5 à 6,1 dB	3,3 à 5,2 dB
Décomposition	3,7 à 5,8 dB	3,0 à 6,1 dB
Filtrage Temporel	0,0 à 1,1 dB	0,4 à 1,5 dB



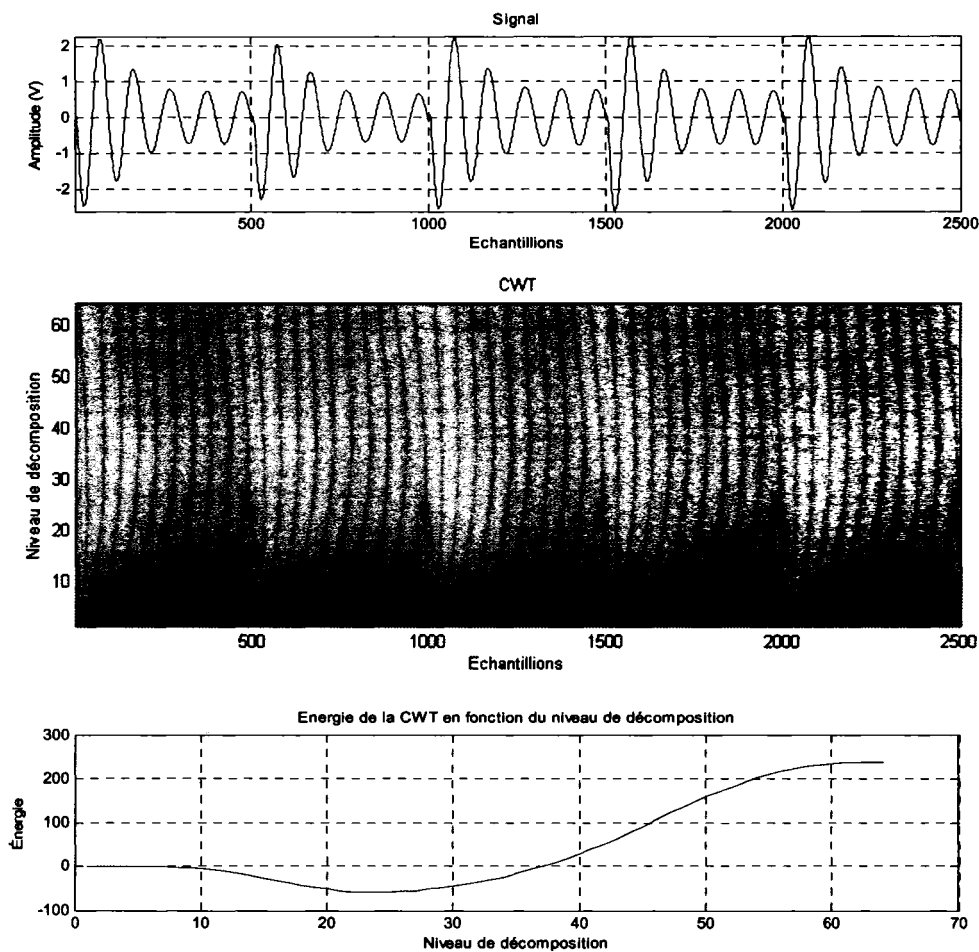
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	2,065	41,6 dB	47,9 dB	43,2 dB	4,7 dB
2	1,930	41,6 dB	47,3 dB	40,8 dB	6,5 dB
3	2,165	41,6 dB	48,3 dB	41,7 dB	6,6 dB
4	2,065	41,6 dB	47,9 dB	41,7 dB	6,2 dB
5	2,040	41,6 dB	47,8 dB	42,4 dB	5,4 dB

Figure 43 Résultats de corrélation d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,740	41,6 dB	46,4 dB	43,2 dB	3,2 dB
2	1,350	41,6 dB	44,2 dB	40,8 dB	3,4 dB
3	1,395	41,6 dB	44,5 dB	41,7 dB	2,8 dB
4	1,585	41,6 dB	45,6 dB	41,7 dB	3,9 dB
5	1,885	41,6 dB	47,1 dB	42,4 dB	4,7 dB

Figure 44 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	2,190	41,6 dB	48,4 dB	43,2 dB	5,2 dB
2	1,530	41,6 dB	45,3 dB	40,8 dB	4,5 dB
3	1,820	41,6 dB	46,8 dB	41,7 dB	5,1 dB
4	2,040	41,6 dB	47,8 dB	41,7 dB	6,1 dB
5	1,930	41,6 dB	47,3 dB	42,4 dB	4,9 dB

Figure 45 Résultats de la distribution CWT d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence

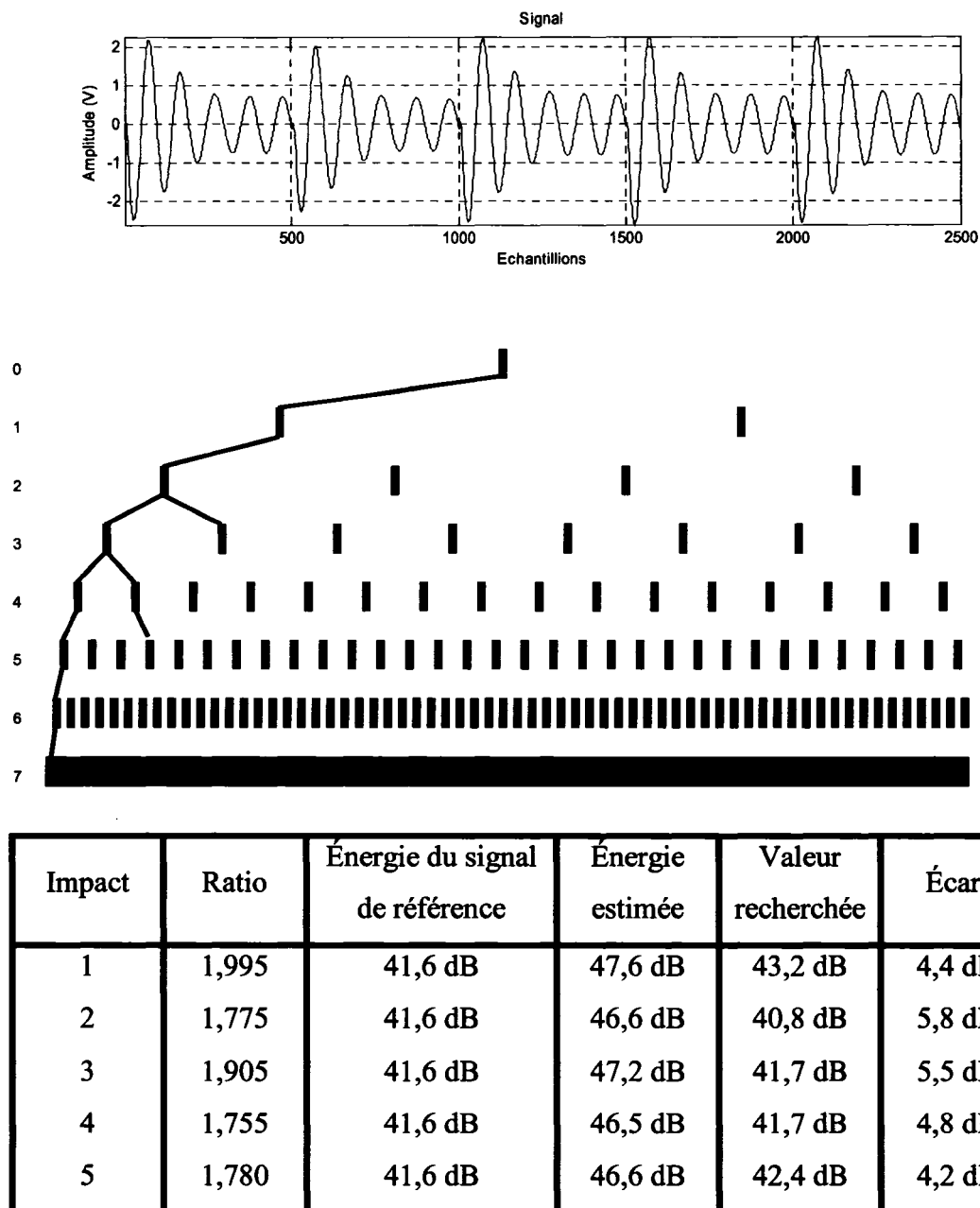
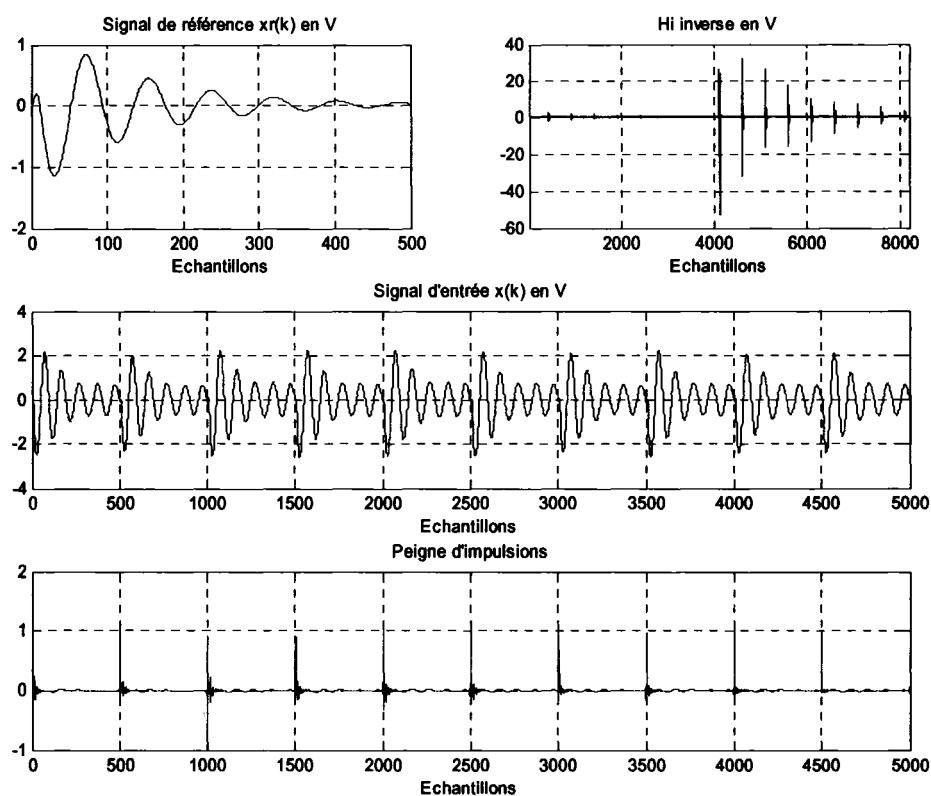


Figure 46 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal ayant 2 sources d'une fréquence



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,230	41,6 dB	43,4 dB	43,2 dB	0,2 dB
2	0,910	41,6 dB	40,8 dB	40,8 dB	0,0 dB
3	1,075	41,6 dB	42,2 dB	41,7 dB	0,5 dB
4	1,085	41,6 dB	42,3 dB	41,7 dB	0,6 dB
5	1,150	41,6 dB	42,8 dB	42,4 dB	0,4 dB

Figure 47 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal ayant 2 sources d'une fréquence

4.2.2.5 Étape 5 : impacts plus rapides

Pour cette étape, 2 signaux différents seront utilisés. Le 1^{er} sera composé de 3 sources ayant 3 fréquences de rayonnement et le 2^{ème} sera composé de 5 sources ayant 5 fréquences de rayonnement. La particularité de ces signaux est que la vitesse des impacts est augmentée, passant de 20 impacts à la seconde à 50 impacts à la seconde. Dans les exemples précédents, pour la fréquence d'échantillonnage utilisée, un impact était composé de 500 échantillons, dans cet exemple un impact est composé de 200 échantillons. Les détails de leur composition sont les suivants :

Signal 1 (59,1 dB) :

Fréquence	Global					
	Référence		Source 2		Source 3	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105

Signal 2 (61,9 dB) :

Global										
Fréquence	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78	2,0	163	1,4	168
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105	1,5	184	1,0	241
4	2,3	260	1,7	400	1,5	125	1,6	254	0,8	306
5	0,8	320	2,4	500	1,6	160	1,3	268	0,9	405

Corrélation :

Le 1er signal étudié est composé de 3 sources ayant chacune 3 fréquences mais dans ce cas-ci, les impacts se font plus rapidement. La figure 48 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation. Pour ce signal, les 3 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont encore de 1, ce qui correspond approximativement aux valeurs obtenues dans la partie du haut. En fait, les valeurs de corrélation maximales obtenues sont voisines de 1,3. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance peut faire la distinction entre les sources. Le signal de référence a une énergie de 55,4 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 1,4 et 2,4 dB. Pour le 2^{ème} signal, celui ayant 5 sources composées de 5 fréquences, l'erreur obtenue varie entre 1,7 et 2,8 dB.

L'estimation de l'énergie de la source de référence est quand même assez bonne. Par contre, les lobes dans les valeurs de corrélation sont quand même élevés. Pour cette

analyse, il est facile de faire une bonne reconnaissance parce que l'on sait où sont situés les impacts, on sait que les lobes latéraux ne sont pas les valeurs recherchées. Dans un cas réel où la position temporelle de la source de référence n'est pas connue, il est possible de faire une erreur lors de la reconnaissance à cause de ces lobes. Cette conclusion s'applique aussi aux exemples précédents.

Distribution temps-fréquence :

La figure 49 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées de 1,5 à 2,7 dB, selon les impacts. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées de 5 fréquences, l'erreur obtenue varie entre 2,2 et 4,1 dB.

L'erreur dans la reconnaissance est, en grande partie, causé par la ressemblance fréquentielle entre les signaux. Par ce fait, cette méthode de reconnaissance surestime l'énergie de la source de référence.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 50 montre la CWT d'un signal composé de 3 sources ayant 3 fréquences de rayonnement. Pour ce signal, les niveaux de décomposition 14 et 45 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent une erreur sur l'énergie de l'estimé variant entre 3,5 et 5,5 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées de 5 fréquences, l'erreur obtenue varie entre 2,8 et 3,9 dB. La même conclusion que précédemment s'applique, cette méthode ne convient pas.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 51. Les erreurs obtenues avec cette méthode de reconnaissance varient entre 3,3 et 5,2 dB. La valeur de l'estimé pour le 2^{ième} impact semble incorrecte, elle dépasse largement les autres valeurs et elle n'est incluse dans la conclusion. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées de 5 fréquences, l'erreur obtenue varie entre 3,1 et 5,7 dB. La même conclusion que précédemment s'applique, cette méthode ne convient pas.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 52 montre les résultats de l'identification à l'aide de filtre sur les signaux temporels. Pour ce signal, les 3 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont encore de 1, ce qui correspond approximativement aux valeurs obtenues avec le peigne d'impulsion. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance peut faire la distinction entre les sources. Le signal de référence a une énergie de 55,4 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,2 et 1,5 dB. Pour le 2^{ième} signal, celui ayant 5 sources composées de 5 fréquences, l'erreur obtenue varie entre 0,5 et 1,6 dB.

Conclusion :

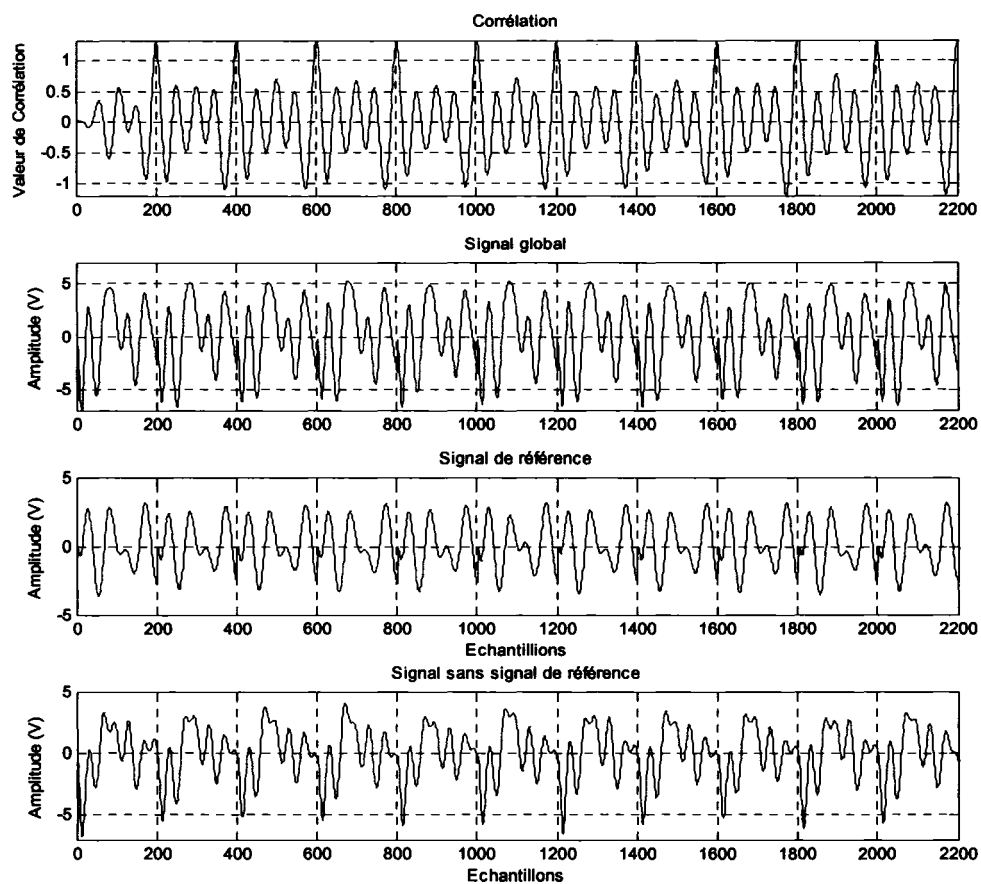
Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance vis à vis des signaux composés de plusieurs sources ayant plusieurs fréquences mais avec des impacts simultanés et plus rapides. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, la méthode utilisant le filtrage temporel des signaux a démontré les meilleures aptitudes. La corrélation et la

distribution temps-fréquence ont obtenu de bons résultats, surtout à cause du signal de référence plus distinctif étant composé de plusieurs fréquences. Les méthodes utilisant les ondelettes ont encore eu les plus grandes erreurs. En général, l'augmentation de la vitesse des impacts n'a pas fait varier la précision des méthodes de reconnaissance.

Tableau IX

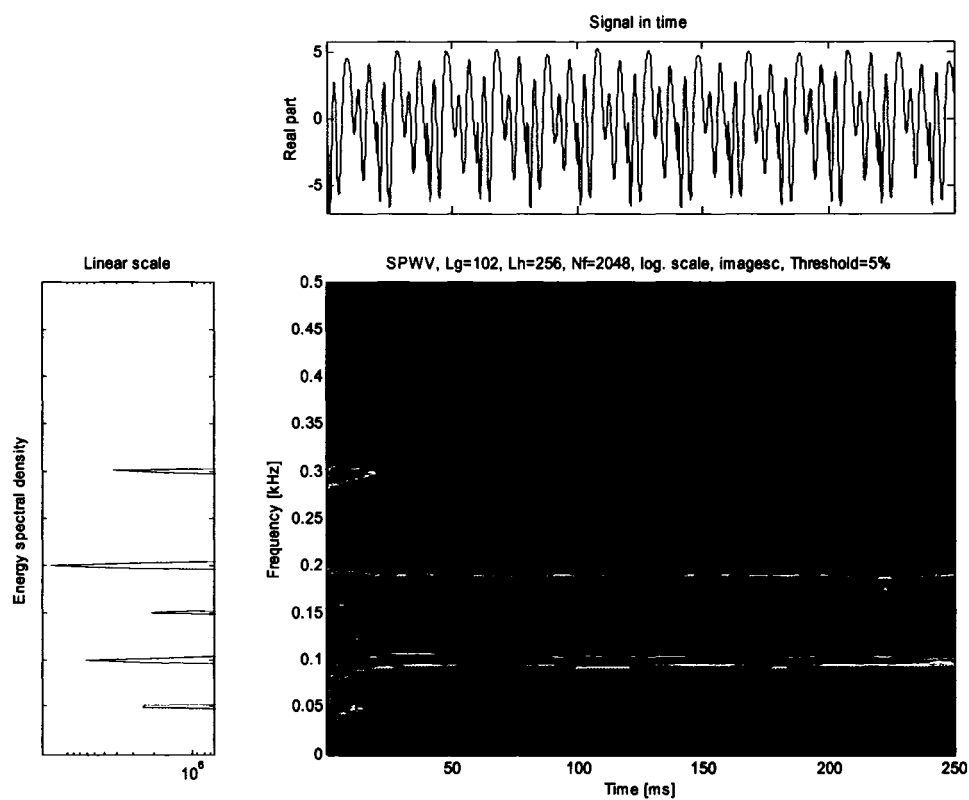
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de plusieurs sources, plusieurs fréquences, impacts simultanés plus rapides

Méthode	Erreur
Corrélation	1,4 à 2,8 dB
SWVD	1,5 à 4,1 dB
CWT	2,8 à 5,5 dB
Décomposition	3,1 à 5,7 dB
Filtrage temporel	0,2 à 1,6 dB



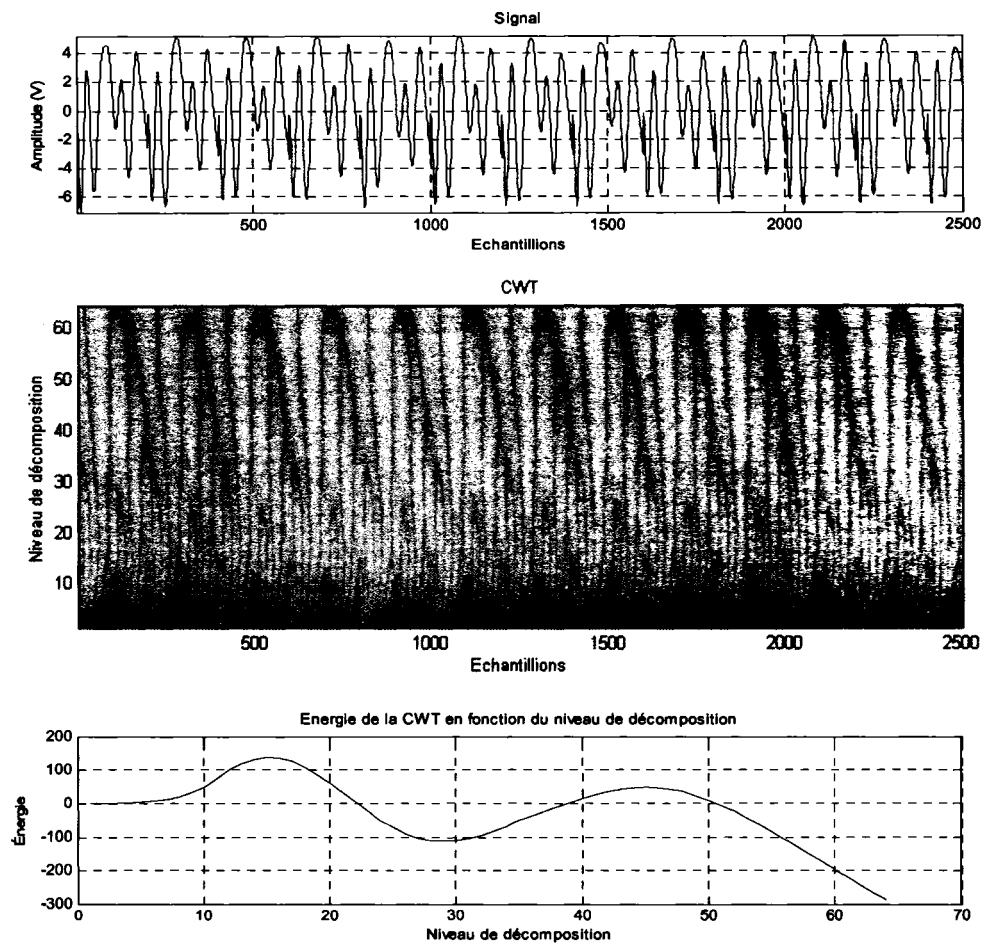
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,260	55,4 dB	57,4 dB	55,7 dB	1,7 dB
2	1,300	55,4 dB	57,7 dB	56,3 dB	1,4 dB
3	1,275	55,4 dB	57,5 dB	56,0 dB	1,5 dB
4	1,260	55,4 dB	57,4 dB	55,0 dB	2,4 dB
5	1,275	55,4 dB	57,5 dB	55,9 dB	1,6 dB

Figure 48 Résultats de corrélation d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,415	55,4 dB	58,4 dB	55,7 dB	2,7 dB
2	1,430	55,4 dB	58,5 dB	56,3 dB	2,2 dB
3	1,445	55,4 dB	58,6 dB	56,0 dB	2,6 dB
4	1,175	55,4 dB	56,8 dB	55,0 dB	1,8 dB
5	1,260	55,4 dB	57,4 dB	55,9 dB	1,5 dB

Figure 49 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,550	55,4 dB	59,2 dB	55,7 dB	3,5 dB
2	1,840	55,4 dB	60,7 dB	56,3 dB	4,4 dB
3	1,860	55,4 dB	60,8 dB	56,0 dB	4,8 dB
4	1,550	55,4 dB	59,2 dB	55,0 dB	4,2 dB
5	1,995	55,4 dB	61,4 dB	55,9 dB	5,5 dB

Figure 50 Résultats de la distribution CWT d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides

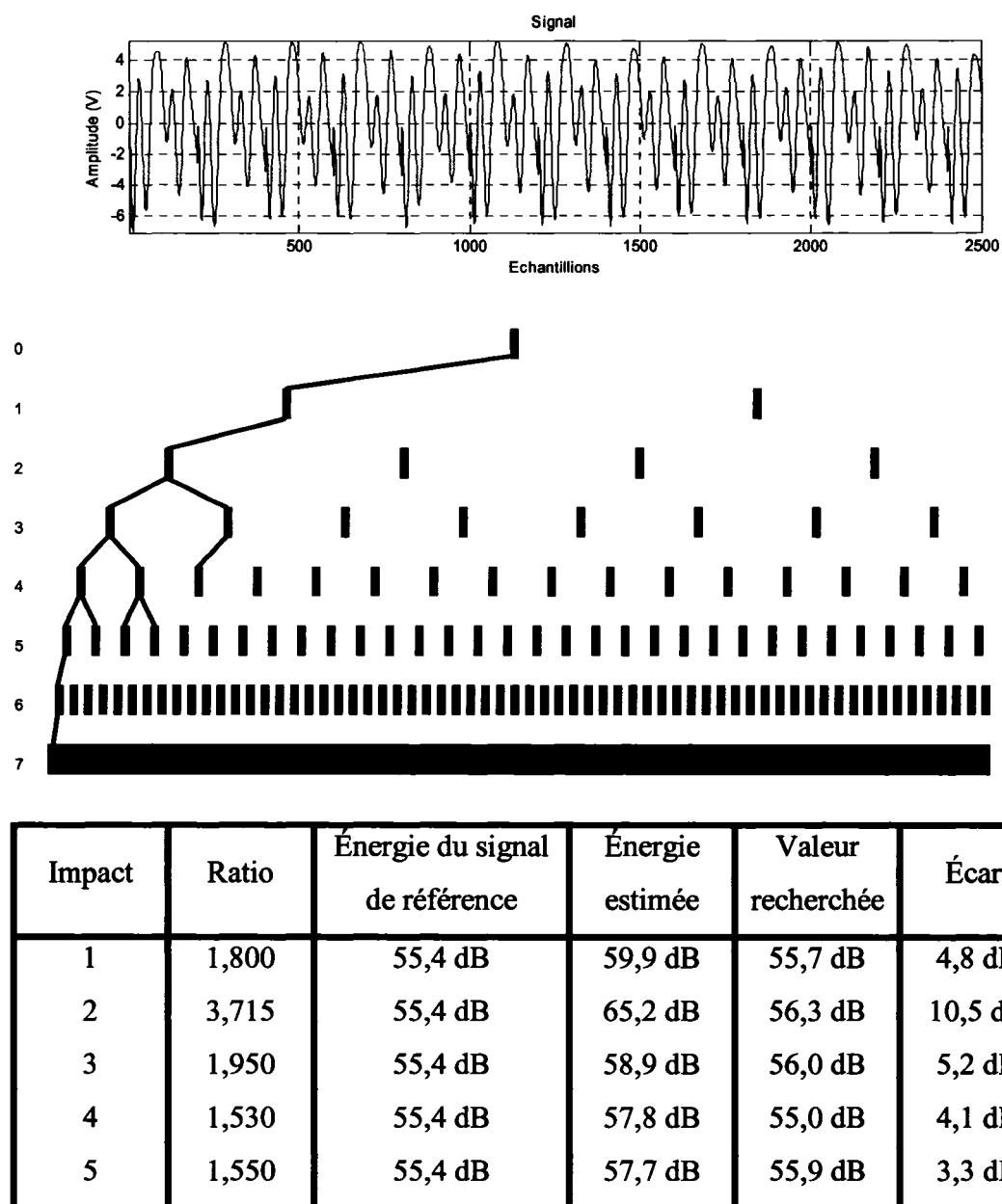
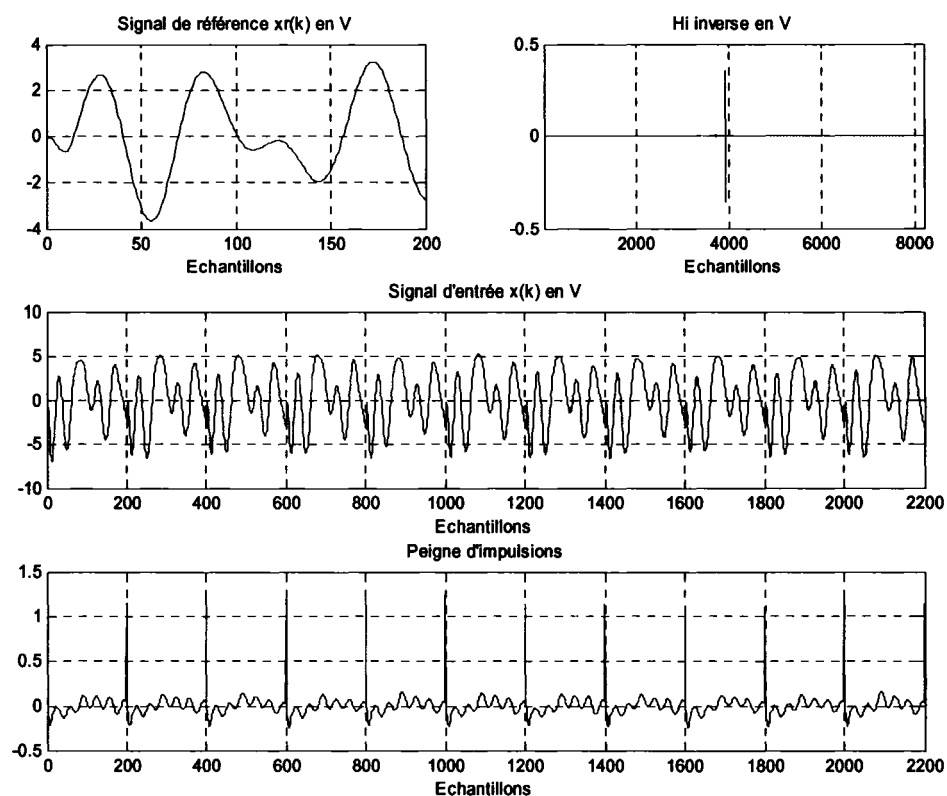


Figure 51 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,060	55,4 dB	55,9 dB	55,7 dB	0,2 dB
2	1,135	55,4 dB	56,5 dB	56,3 dB	0,2 dB
3	1,230	55,4 dB	57,2 dB	56,0 dB	1,2 dB
4	1,135	55,4 dB	56,5 dB	55,0 dB	1,5 dB
5	1,200	55,4 dB	57,0 dB	55,9 dB	1,1 dB

Figure 52 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 3 sources, 3 fréquences, impacts plus rapides

4.2.2.6 Étape 6 : 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire en plus

Pour cette étape, un seul signal sera utilisé. Ce signal sera composé de 5 sources ayant 5 fréquences de rayonnement et des impacts simultanés. Par contre, du bruit aléatoire sera ajouté au signal global, augmentant l'énergie de 4 dB dans un premier temps et 15 dB dans un deuxième temps. Le signal global est composé comme suit :

Signal 1 (59,8 dB sans bruit, 63,7 dB avec 4 dB de plus, 74,8 dB avec 15 dB de plus)) :

Fréquence	Global									
	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78	2,0	163	1,4	168
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105	1,5	184	1,0	241
4	2,3	260	1,7	400	1,5	125	1,6	254	0,8	306
5	0,8	320	2,4	500	1,6	160	1,3	268	0,9	405

Corrélation :

Le signal étudié est composé de 5 sources ayant chacune 5 fréquences mais dans ce cas-ci, une source de bruit de fond aléatoire a été ajoutée. La figure 53 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation. Pour ce signal, les 5 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont encore de 1, ce qui correspond approximativement aux valeurs obtenues dans la partie du haut. En fait, les valeurs de corrélation maximales obtenues sont voisines de 1,45. Ce qui signifie que

cette méthode de reconnaissance peut faire la distinction entre les sources même en présence de bruit de fond. Le signal de référence a une énergie de 55,4 dB et le signal global a une énergie de 63,7 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 1,7 et 2,9 dB. Avec un bruit aléatoire ajoutant 15 dB (énergie globale de 74,8 dB), la reconnaissance donne une erreur variant entre 2,2 et 3,3 dB.

La plage d'erreur obtenue ici est similaire à celle obtenue à l'étape 4 avec des signaux ayant plusieurs fréquences. Il semble donc que l'ajout de bruit aléatoire, non corrélé, n'affecte pas la reconnaissance en utilisant cette méthode.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville :

La figure 54 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées de 2,5 à 4,0 dB, selon les impacts. Avec un bruit aléatoire ajoutant 15 dB, la reconnaissance donne une erreur variant entre 2,2 et 4,3 dB.

La plage d'erreur obtenue ici est supérieure à celle obtenue à l'étape 4 avec des signaux ayant plusieurs fréquences. Ces résultats sont conséquents à l'utilisation de ce genre de méthode : un bruit aléatoire ajoute de l'énergie à toutes les bandes de fréquence, amenant la SWVD à surestimer l'énergie de la source de référence.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 55 montre la CWT d'un signal composé de 5 sources ayant 5 fréquences de rayonnement. Pour ce signal, les niveaux de décomposition 15 et 42 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces

niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent une erreur sur l'énergie de l'estimé variant entre 3,4 et 4,5 dB. Avec un bruit aléatoire ajoutant 15 dB, la reconnaissance donne une erreur variant entre 3,5 et 5,0 dB.

La plage d'erreur obtenue ici est similaire à celle obtenue à l'étape 4 avec des signaux ayant plusieurs fréquences. Il semble donc que l'ajout de bruit aléatoire, non corrélé, n'affecte pas la reconnaissance en utilisant cette méthode.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 56. Les erreurs obtenues avec cette méthode de reconnaissance varient entre 3,9 et 6,4 dB. Avec un bruit aléatoire ajoutant 15 dB, la reconnaissance donne une erreur variant entre 3,5 et 6,3 dB.

La plage d'erreur obtenue ici est similaire à celle obtenue à l'étape 4 avec des signaux ayant plusieurs fréquences. Il semble donc que l'ajout de bruit aléatoire, non corrélé, n'affecte pas la reconnaissance en utilisant cette méthode.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 57 montre les résultats de l'identification à l'aide du filtrage temporel des signaux. Pour ce signal, les 5 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont encore de 1, ce qui correspond approximativement aux valeurs obtenues avec le peigne d'impulsions. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance peut faire la distinction entre les sources même en présence de bruit de fond. Le signal de référence a une énergie de 55,4 dB et le signal global a une énergie

de 63,7 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,4 et 1,4 dB. Avec un bruit aléatoire ajoutant 15 dB (énergie globale de 74,8 dB), la reconnaissance donne une erreur variant entre 1,1 et 2,0 dB.

Comme montré à la figure 57, la présence du bruit aléatoire a ajouté des perturbations dans le peigne d'impulsions. Ces perturbations ont atteint et même dépassé les valeurs des impulsions recherchées. Dans notre exemple, on connaît la position (synchronisation entre source de référence dans le signal global et l'inverse de la réponse impulsionnelle lors de la convolution) à la quelle doit se trouver l'impulsion, il est donc possible de connaître la valeur de l'impulsion recherchée. Dans une situation réelle, cette position n'est pas nécessairement connue. Pour contourner ce problème, il existe 3 approches :

- Le signal global pourrait être filtré afin d'éliminer le bruit aléatoire. Cette solution n'est pas exactement le but recherché dans cet exercice.
- Au lieu de prendre l'inverse de la réponse impulsionnelle, on pourrait prendre la pseudo inverse de la réponse impulsionnelle. En fait il s'agit de garder les bandes spectrales d'intérêt dans la FFT avant de procéder à la FFT inverse. Cette solution permettra de couper l'énergie du signal hors-bande et ainsi diminuer l'énergie du bruit. Mais il faut garder en tête que dans les zones d'intérêt, l'énergie du bruit s'additionne au signal.
- La dernière approche consiste à trouver la position de la synchronisation entre la source de référence dans le signal global et l'inverse de la réponse impulsionnelle lors de la convolution. En fait il faut déterminer où seraient les impulsions sans la présence des autres sources de bruit dans le signal global. Cette approche peut également être utilisée avec des signaux réels.

Développement de l'approche permettant de synchroniser les impacts :

Pour maximiser les chances de reconnaissance, il faut trouver la position de la synchronisation entre la source de référence dans le signal global et l'inverse de la réponse impulsionnelle lors de la convolution. Pour faire cette synchronisation plusieurs méthodes peuvent être utilisées : corrélation, distribution temps-fréquence, ... Il a été décidé d'utiliser une méthode utilisant le filtrage adaptatif parce qu'avec cette dernière le décalage temporel peut être évalué à l'aide des coefficients du filtre. Ce filtre sera utilisé comme une optimisation unique sur une fenêtre temporelle glissante du signal global. Comme le filtre adaptatif de type RLS peut atteindre un niveau de stabilité plus rapidement que les autres, c'est ce dernier qui sera utilisé. Ce type de filtre est décrit à l'annexe 1. La façon de faire sera la suivante :

- À l'aide d'information connue sur la génération des impacts (par exemple la vitesse de rotation du moteur), le nombre d'échantillon requis pour définir un seul impact sera défini,
- Un signal de référence, ayant ce nombre d'échantillon et contenant un seul impact sera défini,
- Une fenêtre temporelle ayant ce nombre d'échantillon servira à extraire une section du signal global,
- L'estimé $y(k)$ sera calculé à l'aide du signal de référence et de la section du signal global,
- La fenêtre temporelle sera décalée et l'estimé sera de nouveau calculé,
- Les 2 dernières étapes seront répétées jusqu'à atteindre la longueur désirée.

Avec cette procédure, il est possible d'avoir le ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction de la position de la fenêtre temporelle. Les minima de cette fonction représentent l'emplacement où le signal de référence est synchronisé avec le signal global. Avec cette information, il est possible de connaître les emplacements

où la source de référence, dans le signal global, et l'inverse de la réponse impulsionnelle seront synchronisées lors de la convolution.

La figure 58 montre l'évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre. Les minima sur cette figure représentent les positions où l'impact du signal de référence est synchronisé avec les impacts du signal global. Donc, en observant les valeurs du peigne d'impulsion aux endroits ainsi déterminés, il est possible d'évaluer l'énergie de la source de référence. Noter le deuxième minimum qui suit immédiatement après le minimum absolu, celui-ci correspond à la périodicité de signal de référence (sinusoïde décroissante). Il y a donc un autre minimum lors de la 2^{ième} période du signal mais pas aussi prononcé que celui obtenu lorsque la synchronisation est parfaite.

De plus, en observant l'évolution des coefficients du filtre, lorsque les signaux sont parfaitement synchronisés, le premier coefficient est celui dont le module est supérieur au autres. Lorsque les signaux sont décalés de 1 échantillon, le 2^{ième} coefficient a le module le plus élevé, et ainsi de suite. Il est donc possible, en observant l'évolution des coefficients du filtre, de synchroniser les signaux. Dans notre cas, le ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé et l'évolution des coefficients du filtre donnent la même information de synchronisation.

À l'aide de ces informations, il est possible de déterminer l'énergie de la source de référence à l'aide du graphe d'impulsions même si le peigne d'impulsions n'est pas visible; il faut simplement observer la valeur du graphe d'impulsions à l'échantillon où la synchronisation est bonne. La figure 59 montre une partie agrandie des graphes d'impulsions obtenus avec les sources de bruit aléatoire ajoutées (4 dB et 15 dB de plus). Ces 2 graphes montrent une valeurs près de 1 donc la reconnaissance fonctionne bien si l'on peut avoir l'information de synchronisation.

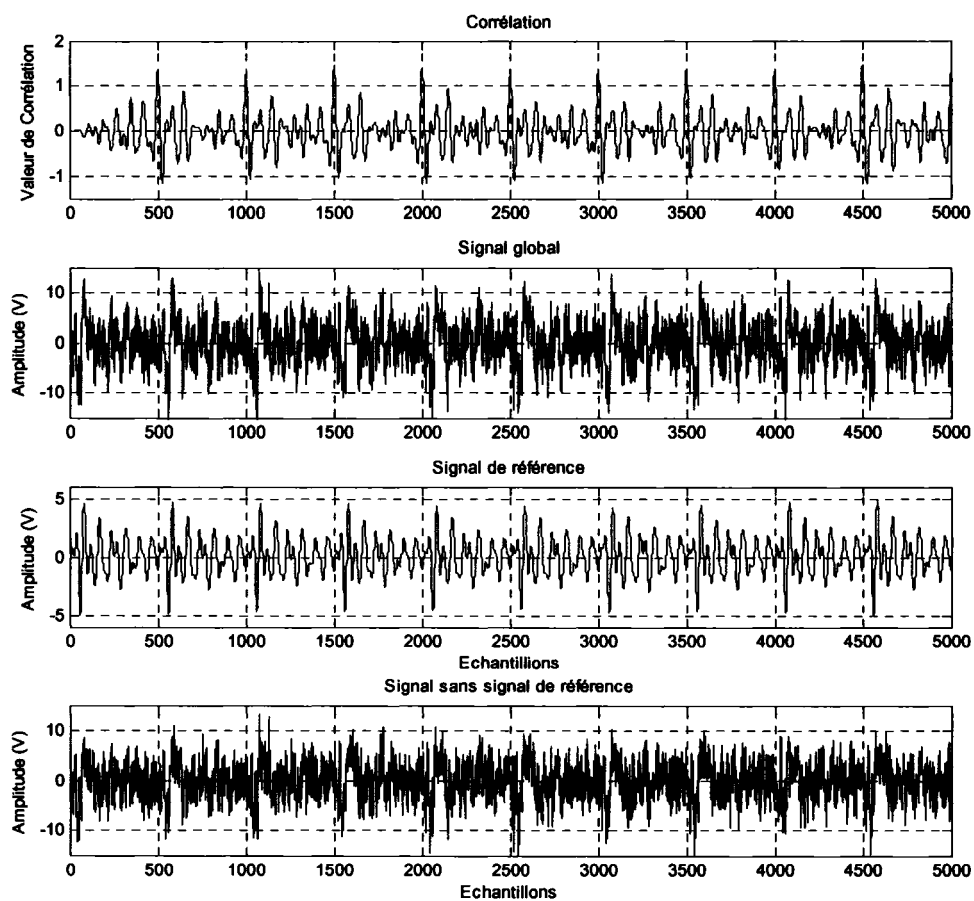
Conclusion :

Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance vis à vis des signaux plus complexes, composés de 5 sources ayant 5 fréquences, avec des impacts simultanés et un bruit aléatoire. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, la méthode utilisant le filtrage temporel a démontré les meilleures aptitudes, surtout avec l'aide de la synchronisation. Notons cependant que l'erreur obtenue est plus importante qu'avec les signaux précédents. La corrélation a obtenu des résultats similaires à ceux sans bruit aléatoire. La distribution temps-fréquence a vu son erreur augmentée, principalement à cause de l'augmentation de l'énergie du contenu fréquentiel dû à la présence de bruit aléatoire. Les méthodes utilisant les ondelettes ont encore eu les plus grandes erreurs.

Tableau X

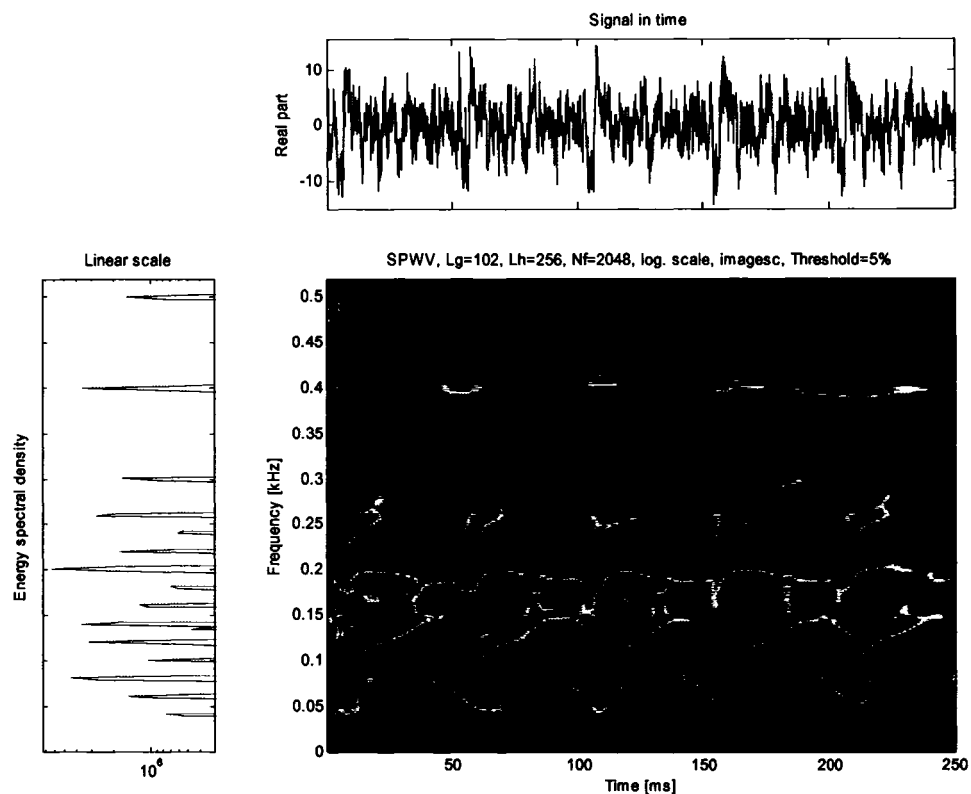
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire en plus

Méthode	Erreur (4 dB de bruit)	Erreur (15 dB de bruit)
Corrélation	1,7 à 2,9 dB	2,2 à 3,3 dB
SWVD	2,2 à 4,0 dB	2,2 à 4,3 dB
CWT	3,4 à 4,5 dB	3,5 à 5,0 dB
Décomposition	3,9 à 6,4 dB	3,5 à 6,3 dB
Filtrage Temporel	0,4 à 1,4 dB	1,1 à 2,0 dB



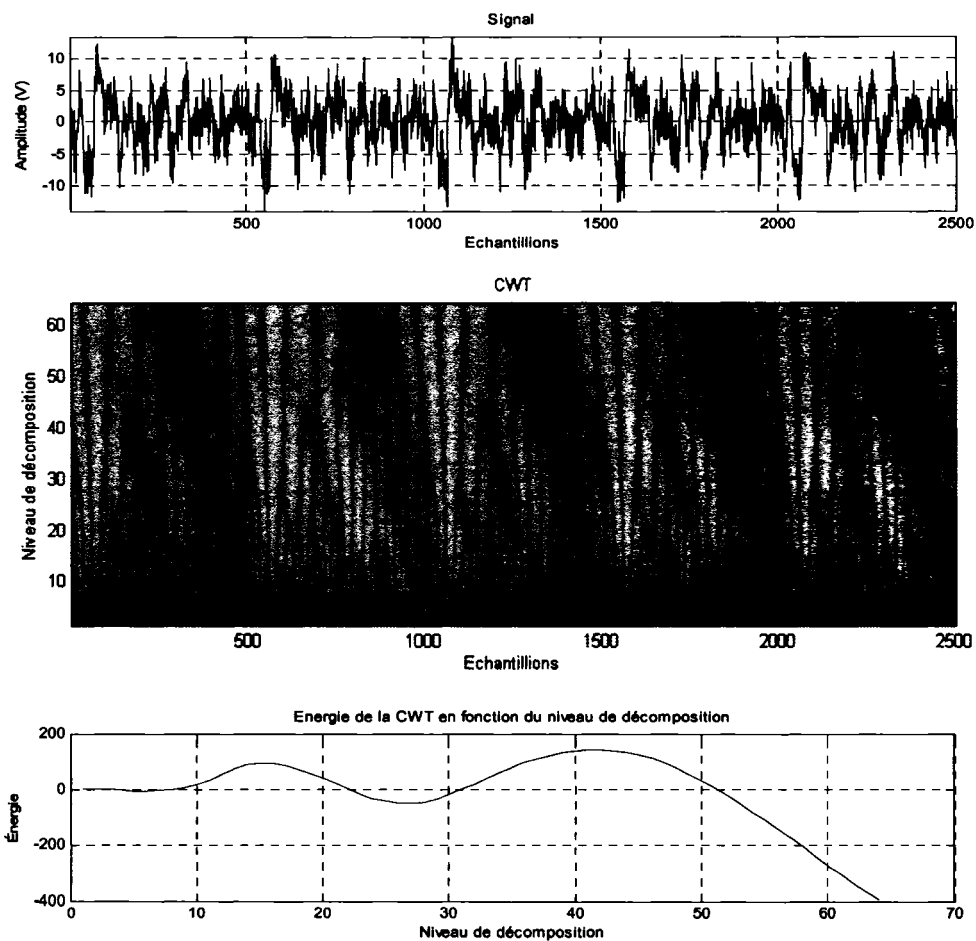
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,445	55,4 dB	58,6 dB	55,7 dB	2,9 dB
2	1,380	55,4 dB	58,2 dB	56,1 dB	2,1 dB
3	1,305	55,4 dB	57,7 dB	55,4 dB	2,3 dB
4	1,315	55,4 dB	57,8 dB	56,1 dB	1,7 dB
5	1,245	55,4 dB	57,3 dB	54,8 dB	2,5 dB

Figure 53 Résultats de corrélation d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,380	55,4 dB	58,2 dB	55,7 dB	2,5 dB
2	1,515	55,4 dB	59,0 dB	56,1 dB	2,9 dB
3	1,460	55,4 dB	58,7 dB	55,4 dB	3,3 dB
4	1,720	55,4 dB	60,1 dB	56,1 dB	4,0 dB
5	1,245	55,4 dB	57,3 dB	54,8 dB	3,7 dB

Figure 54 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,740	55,4 dB	60,2 dB	55,7 dB	4,5 dB
2	1,660	55,4 dB	59,8 dB	56,1 dB	3,7 dB
3	1,625	55,4 dB	59,6 dB	55,4 dB	4,2 dB
4	1,600	55,4 dB	59,5 dB	56,1 dB	3,4 dB
5	1,515	55,4 dB	59,0 dB	54,8 dB	4,2 dB

Figure 55 Résultats de la distribution CWT d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus

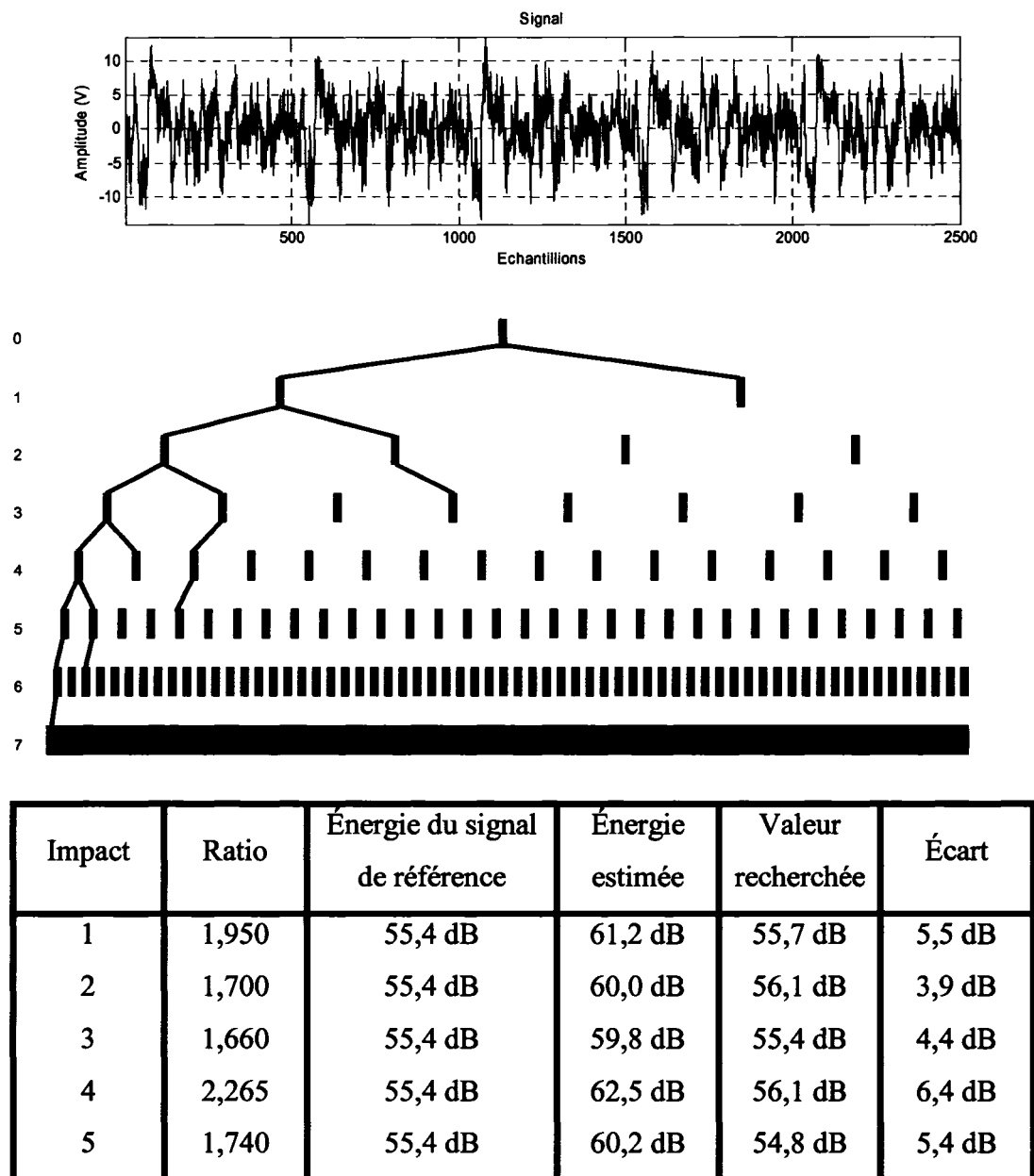
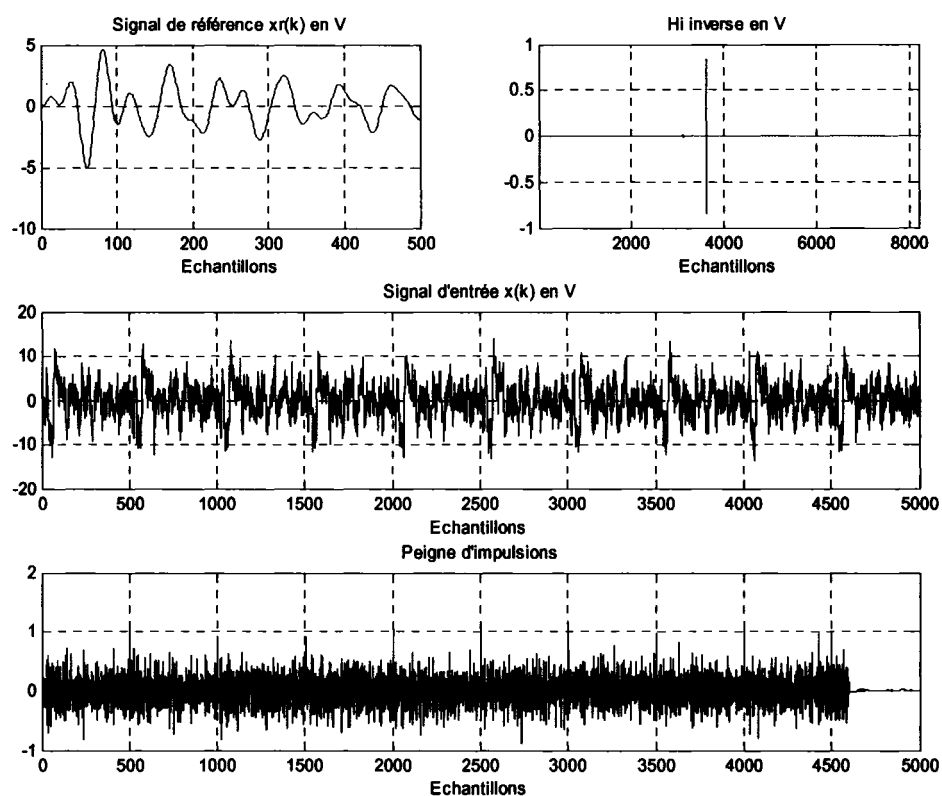


Figure 56 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	1,160	55,4 dB	56,7 dB	55,7 dB	1,0 dB
2	0,925	55,4 dB	54,7 dB	56,1 dB	1,4 dB
3	0,905	55,4 dB	54,5 dB	55,4 dB	0,9 dB
4	1,035	55,4 dB	55,7 dB	56,1 dB	0,4 dB
5	1,060	55,4 dB	55,9 dB	54,8 dB	1,1 dB

Figure 57 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 5 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire de 4 dB en plus

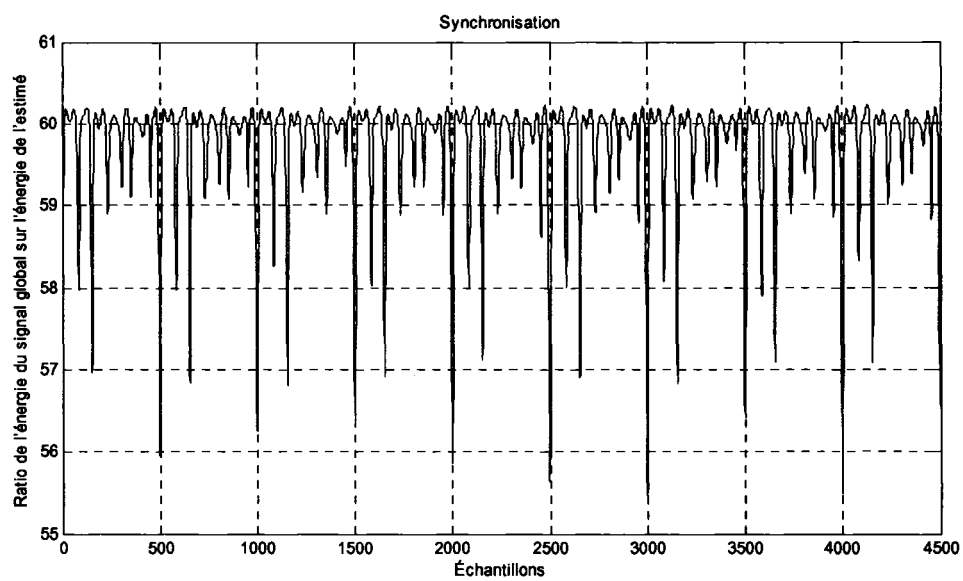


Figure 58 Évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre

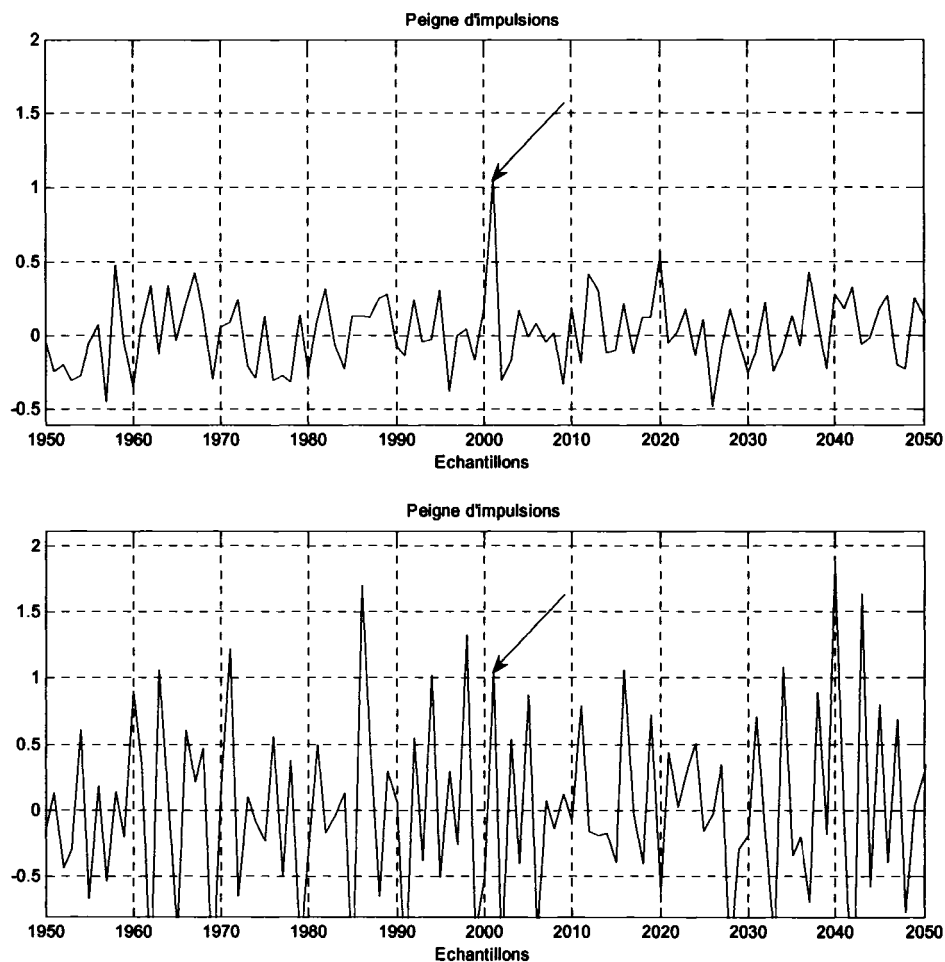


Figure 59 Valeur de l'impulsion avec bruit aléatoire de 4 dB en plus (courbe du haut) et bruit aléatoire de 15 dB (courbe du bas)

4.2.2.7 Étape 7 : 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire

Pour cette étape, un seul signal sera utilisé. Ce signal sera composé de 5 sources ayant 5 fréquences de rayonnement et des impacts simultanés. Un bruit aléatoire sera ajouté au signal global, augmentant l'énergie de 4 dB. Par contre, l'amplitude du signal de référence sera divisée par 2, ceci dans le but d'évaluer la capacité des méthodes de

reconnaissance à bien estimer la variation d'amplitude entre la source de référence et le signal de référence. Le signal global est composé comme suit :

Signal 1 (59,8 dB sans bruit, 63,7 dB avec 4 dB de plus) :

Fréquence	Global									
	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	1,5	121	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123
2	2,0	135	2,0	200	2,1	78	2,0	163	1,4	168
3	2,2	210	1,6	300	2,0	105	1,5	184	1,0	241
4	2,3	260	1,7	400	1,5	125	1,6	254	0,8	306
5	0,8	320	2,4	500	1,6	160	1,3	268	0,9	405

Corrélation :

La figure 60 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation. Pour ce signal, les 5 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont de 2, à cause de différences d'amplitude du signal de référence, ce qui ne correspond pas aux valeurs obtenues dans la partie du haut. En fait, les valeurs de corrélation maximales obtenues sont voisines de 3,2. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance peut estimer la variation d'amplitude entre le signal de référence et la source de référence, mais, qu'en additionnant l'erreur dans la reconnaissance, l'estimé s'éloigne des valeurs recherchées. Le signal de référence a une énergie de 49,4 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 2,4 et 4,1 dB.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville :

La figure 61 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé s'écartent des valeurs recherchées de 3,3 à 4,7 dB, selon les impacts. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues à l'étape 4, signifiant ainsi que cette méthode tient compte efficacement de la variation d'amplitude entre le signal de référence et la source de référence.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 62 montre la CWT d'un signal composé de 5 sources ayant 5 fréquences de rayonnement. Pour ce signal, les niveaux de décomposition 15 et 42 sont ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux le signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent une erreur sur l'énergie de l'estimé variant entre 4,2 et 5,5 dB. Les erreurs obtenues sont supérieures à celles de l'étape 4, signifiant ainsi que cette méthode ne peut pas tenir compte efficacement de la variation d'amplitude entre le signal de référence et la source de référence.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 63. Les erreurs obtenues avec cette méthode de reconnaissance varient entre 5,6 et 7,2 dB. Les erreurs obtenues sont supérieures à celles de l'étape 4, signifiant ainsi que cette méthode ne peut pas tenir compte efficacement de la variation d'amplitude entre le signal de référence et la source de référence.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 64 montre les résultats de l'identification à l'aide du filtrage temporel. Pour ce signal, les 5 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs des impulsions recherchées sont de 2, à cause de différences d'amplitude du signal de référence, ce qui correspond bien aux valeurs obtenues. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance peut estimer la variation d'amplitude entre le signal de référence et la source de référence. Le signal de référence a une énergie de 49,4 dB. Les variations entre l'énergie de l'estimé et l'énergie recherchée, pour les 5 premiers impacts, sont entre 0,5 et 1,3 dB.

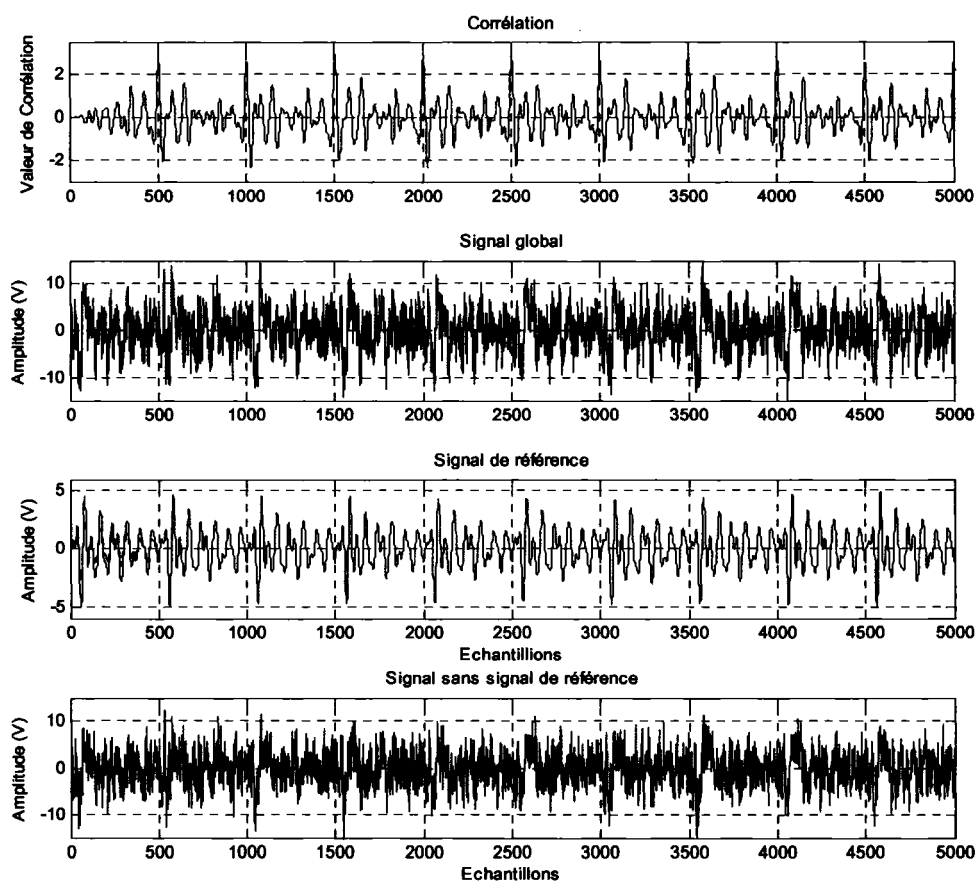
Conclusion :

Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance vis à vis des signaux plus complexes, composés de 5 sources ayant 5 fréquences, avec des impacts simultanés et un bruit aléatoire. De plus, l'amplitude du signal de référence était inférieure à celle de la source de référence. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Parmi celles-ci, la méthode utilisant le filtrage temporel a démontré les meilleures aptitudes. Les autres méthodes de reconnaissance ont obtenu des résultats moindres. La corrélation s'ajuste bien au changement d'amplitude du signal de référence mais en tenant compte de la précision de la méthode, l'erreur dans la reconnaissance est plus élevée. La distribution temps-fréquence s'ajuste bien à la variation d'amplitude du signal de référence. Les méthodes utilisant les ondelettes ont une erreur trop grande pour être efficaces.

Tableau XI

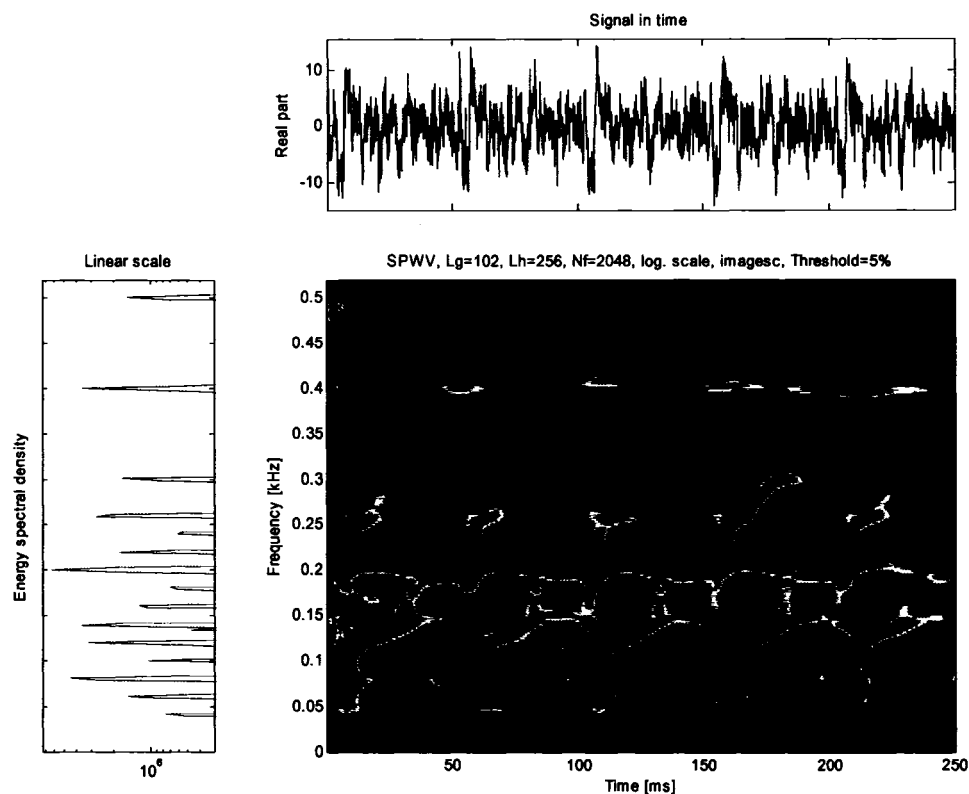
Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire

Méthode	Erreur
Corrélation	2,4 à 4,1 dB
SWVD	3,3 à 4,7 dB
CWT	4,2 à 5,5 dB
Décomposition	5,6 à 7,2 dB
Filtrage temporel	0,5 à 1,3 dB



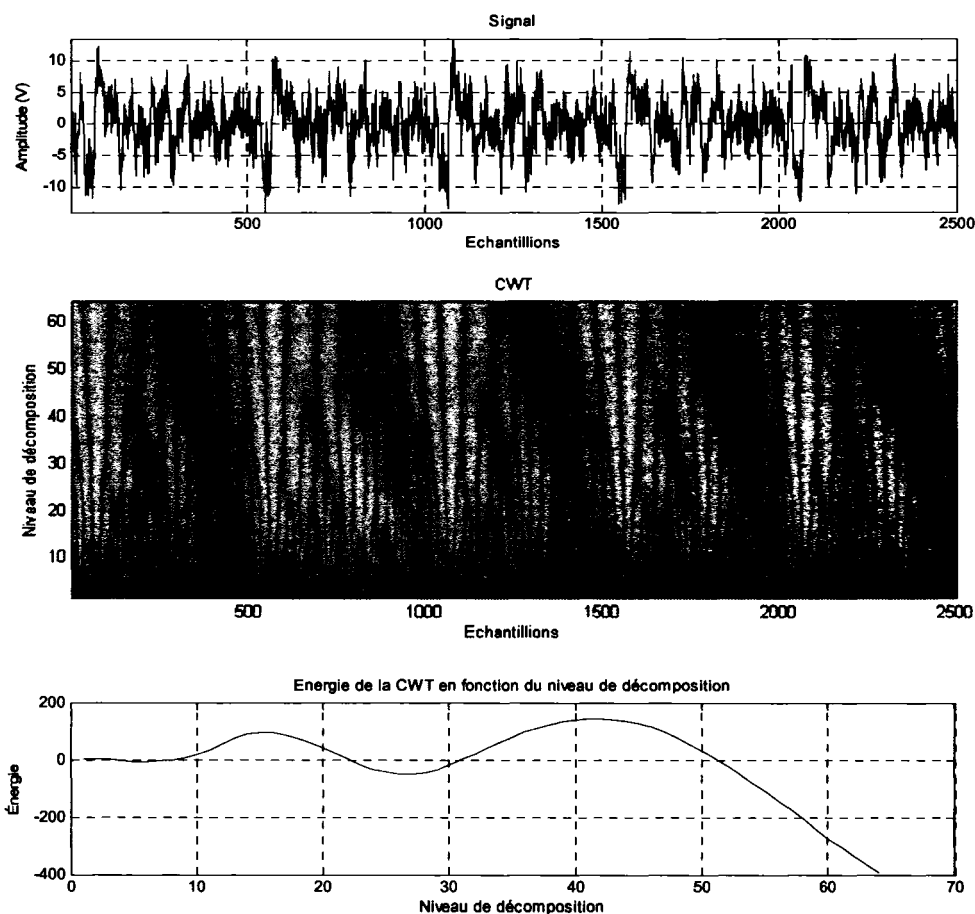
Impact	Corrélation	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	2,985	49,4 dB	58,9 dB	55,7 dB	3,2 dB
2	2,915	49,4 dB	58,7 dB	56,1 dB	2,6 dB
3	3,200	49,4 dB	59,5 dB	55,4 dB	4,1 dB
4	2,850	49,4 dB	58,5 dB	56,1 dB	2,4 dB
5	2,510	49,4 dB	57,4 dB	54,8 dB	2,6 dB

Figure 60 Résultats de corrélation d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	3,020	49,4 dB	59,0 dB	55,7 dB	3,3 dB
2	3,235	49,4 dB	59,6 dB	56,1 dB	3,5 dB
3	3,125	49,4 dB	59,3 dB	55,4 dB	3,9 dB
4	3,715	49,4 dB	60,8 dB	56,1 dB	4,7 dB
5	3,055	49,4 dB	59,1 dB	54,8 dB	4,3 dB

Figure 61 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire



Impact	Ratio	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	3,890	49,4 dB	61,2 dB	55,7 dB	5,5 dB
2	3,510	49,4 dB	60,3 dB	56,1 dB	4,2 dB
3	3,275	49,4 dB	59,7 dB	55,4 dB	4,3 dB
4	3,630	49,4 dB	60,6 dB	56,1 dB	4,5 dB
5	3,350	49,4 dB	59,9 dB	54,8 dB	5,1 dB

Figure 62 Résultats de la distribution CWT d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire

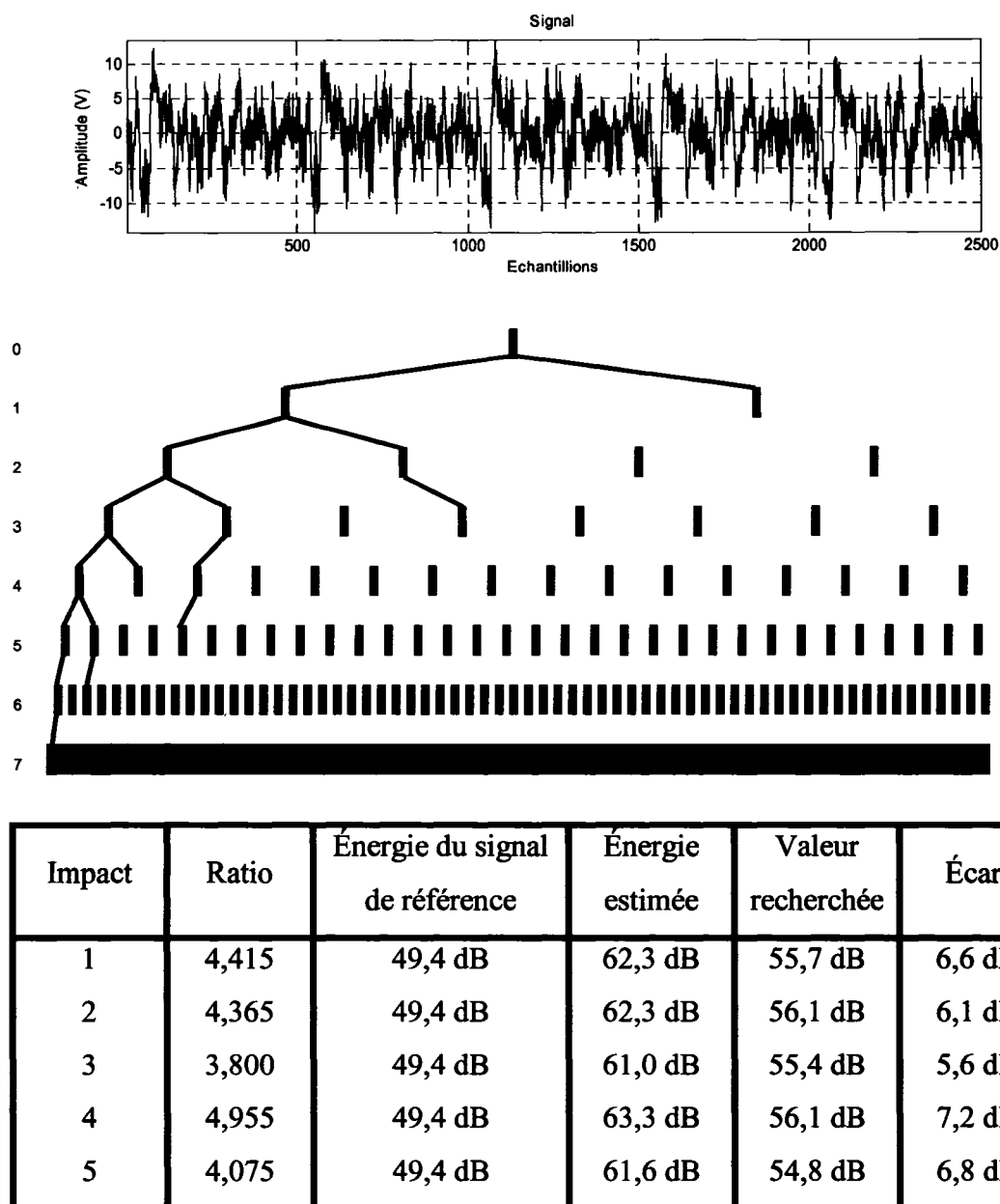
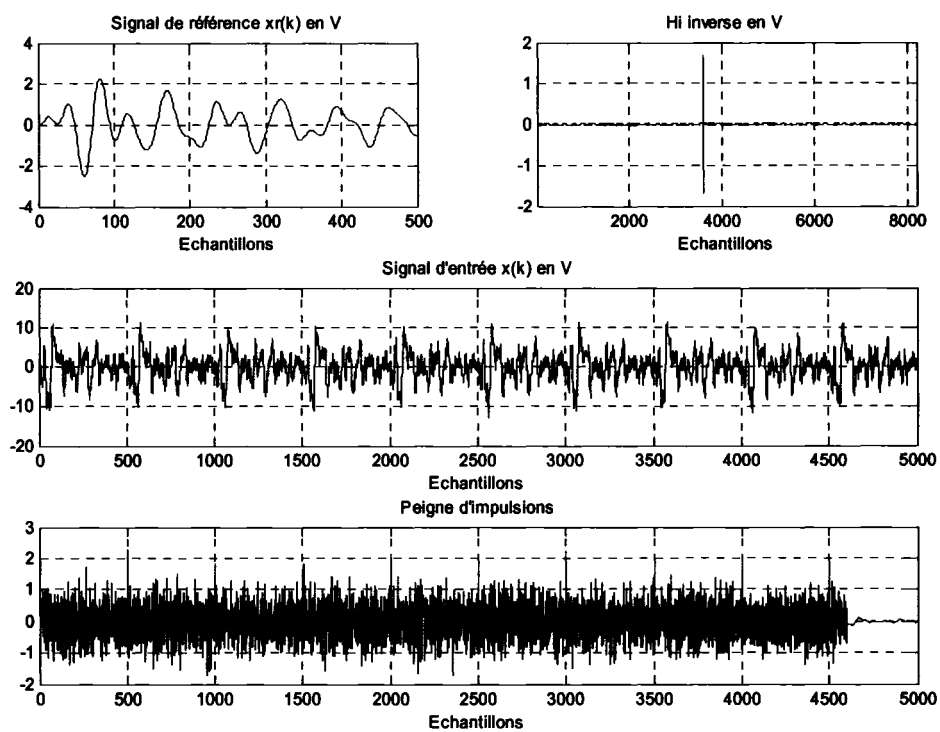


Figure 63 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire



Impact	Impulsion	Énergie du signal de référence	Énergie estimée	Valeur recherchée	Écart
1	2,370	49,4 dB	56,9 dB	55,7 dB	1,2 dB
2	1,860	49,4 dB	54,8 dB	56,1 dB	1,3 dB
3	1,885	49,4 dB	54,9 dB	55,4 dB	0,5 dB
4	2,020	49,4 dB	55,5 dB	56,1 dB	0,6 dB
5	1,995	49,4 dB	55,4 dB	54,8 dB	0,6 dB

Figure 64 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 5 sources, 5 fréquences, amplitude du signal de référence divisée par 2, avec bruit aléatoire

4.2.2.8 Étape 8 : 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence

Pour cette étape, un seul signal sera utilisé. Ce signal sera composé de 4 sources ayant 5 fréquences de rayonnement et des impacts simultanés. Un bruit aléatoire sera ajouté au signal global, augmentant l'énergie de 4 dB. En fait, ce signal est le même que celui de l'étape précédente mais sans la source de référence. L'objectif ici est de vérifier quelle sera l'estimé de la source de référence fournie par les méthodes de reconnaissance dans le cas où elle n'y est pas. Le signal global est composé comme suit :

Signal 1 (58,7 dB sans bruit, 62,8 dB avec 4 dB de plus :

Fréquence	Global									
	Référence		Source 2		Source 3		Source 4		Source 5	
	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.	Amp.	Fréq.
1	-	-	1,4	100	2,0	50	2,5	68	1,6	123
2	-	-	2,0	200	2,1	78	2,0	163	1,4	168
3	-	-	1,6	300	2,0	105	1,5	184	1,0	241
4	-	-	1,7	400	1,5	125	1,6	254	0,8	306
5	-	-	2,4	500	1,6	160	1,3	268	0,9	405

Corrélation :

Le signal étudié est composé de 4 sources ayant chacune 5 fréquences mais la source de référence a été enlevée dans ce cas-ci. Une source de bruit de fond aléatoire a été

ajoutée. La figure 65 montre les résultats de l'identification à l'aide de la corrélation. Pour ce signal, les 4 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont de 0, ce qui ne correspond pas aux valeurs obtenues dans la partie du haut. En fait, les valeurs de corrélation maximales obtenues sont voisines de 0,5. Ce qui signifie que cette méthode de reconnaissance confond les autres sources avec la source de référence. Le signal de référence a une énergie de 55,4 dB. L'énergie de l'estimé varie entre 48,4 et 50,1 dB. Cette méthode de reconnaissance suppose que la source de référence est présente et qu'elle vaut autour de 50 dB. L'énergie du signal global est de 62,8 dB. Cette méthode de reconnaissance suppose que la source de référence est présente dans le signal global mais qu'elle vaut 12,8 dB de moins que le signal global. Cette différence de niveau permet de conclure que l'énergie de la source de référence est inférieure à celle du signal global mais que sa présence est non négligeable.

Distribution temps-fréquence Wigner-Ville :

La figure 66 montre les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une distribution temps-fréquence. Le signal de référence utilisé est le même que pour la corrélation. Les valeurs de l'énergie de l'estimé varient entre 51,5 et 52,2 dB. L'énergie du signal global est de 62,8 dB. Cette méthode de reconnaissance suppose que la source de référence est présente dans le signal global mais qu'elle vaut 10,6 dB de moins que le signal global. Cette différence de niveau permet de conclure que l'énergie de la source de référence est inférieure à celle du signal global mais que sa présence est non négligeable.

Transformée continue d'ondelettes (CWT) :

La figure 67 montre la CWT d'un signal composé de 4 sources ayant 5 fréquences de rayonnement. Pour le signal de référence, les niveaux de décomposition 15 et 42 sont

ceux ayant le plus d'énergie et, par le fait même, sont ceux qui caractérisent mieux ce signal. Ces niveaux de décomposition deviennent *la référence* caractérisant notre signal. En comparant ce gabarit à la CWT du signal global, contenant plusieurs impacts, les résultats montrent que l'énergie de l'estimé varie entre 49,7 et 51,4 dB. L'énergie du signal global est de 62,8 dB. Cette méthode de reconnaissance suppose que la source de référence est présente dans le signal global mais qu'elle vaut 11,4 dB de moins que le signal global. Cette différence de niveau permet de conclure que l'énergie de la source de référence est inférieure à celle du signal global mais que sa présence est non négligeable.

Décomposition par ondelettes :

Les résultats de la reconnaissance à l'aide d'une décomposition par ondelettes sont présentés à la figure 68. L'énergie de l'estimé varie entre 48,9 et 50,7 dB avec cette méthode de reconnaissance. L'énergie du signal global est de 62,8 dB. Cette méthode de reconnaissance suppose que la source de référence est présente dans le signal global mais qu'elle vaut 12,1 dB de moins que le signal global. Cette différence de niveau permet de conclure que l'énergie de la source de référence est inférieure à celle du signal global mais que sa présence est non négligeable.

Filtrage temporel des signaux :

La figure 69 montre les résultats de l'identification à l'aide du filtrage temporel. Pour ce signal, les 4 sources ont des impacts simultanés. Les valeurs pondérées recherchées sont de 0, ce qui correspond aux valeurs obtenues dans le graphe des impulsions (figure 70). Cette dernière figure montre les endroits où auraient dû se situer les valeurs des impulsions. Comme dans les exemples précédents, c'est-à-dire en observant l'évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé (figure 71), il est évident

que la source de référence n'est pas présente. En effet, sur cette dernière figure, les minima de la courbe ne sont pas aux endroits escomptés. De plus, ils n'ont pas le bon pas en échantillons car il devrait y avoir une variation de 500 échantillons entre les minima (note : dans un cas réel, cette information est disponible en connaissant la fréquence des impacts du système observé).

Il est donc possible de conclure que cette méthode de reconnaissance peut évaluer l'absence ou la faible présence d'une source. Le signal de référence a une énergie de 55,4 dB. L'énergie de l'estimé varie entre 36,4 et 38,2 dB. L'énergie du signal global est de 62,8 dB. Cette méthode de reconnaissance suppose que la source de référence est présente dans le signal global mais qu'elle vaut 24 dB de moins que le signal global. Cette différence de niveau permet de conclure que l'énergie de la source de référence est très inférieure à celle du signal global et qu'elle est négligeable.

Conclusion :

Cette section a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance en présence d'un signal global ne contenant pas la source de référence. Le tableau suivant montre les performances des différentes méthodes. Le niveau résiduel correspond à la différence, en dB, entre le niveau global et l'estimé de la source de référence. Parmi celles-ci, la méthode utilisant le filtrage temporel a démontré les meilleures aptitudes, c'est celle-ci qui a donné l'estimé le plus faible. Les autres méthodes de reconnaissance ont obtenu des niveaux d'estimés suffisamment élevés pour laisser croire à la présence de la source de référence.

Tableau XII

Performances des différentes méthodes de reconnaissance avec un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence, (signal global 62,8 dB)

Méthode	Estimé	Niveau résiduel
Corrélation	48,4 à 50,1 dB	12,8 dB
SWVD	51,5 à 52,2 dB	10,6 dB
CWT	49,7 à 51,4 dB	11,4 dB
Décomposition	48,7 à 50,7 dB	12,1 dB
Filtrage temporel	36,4 à 38,2 dB	24,0 dB

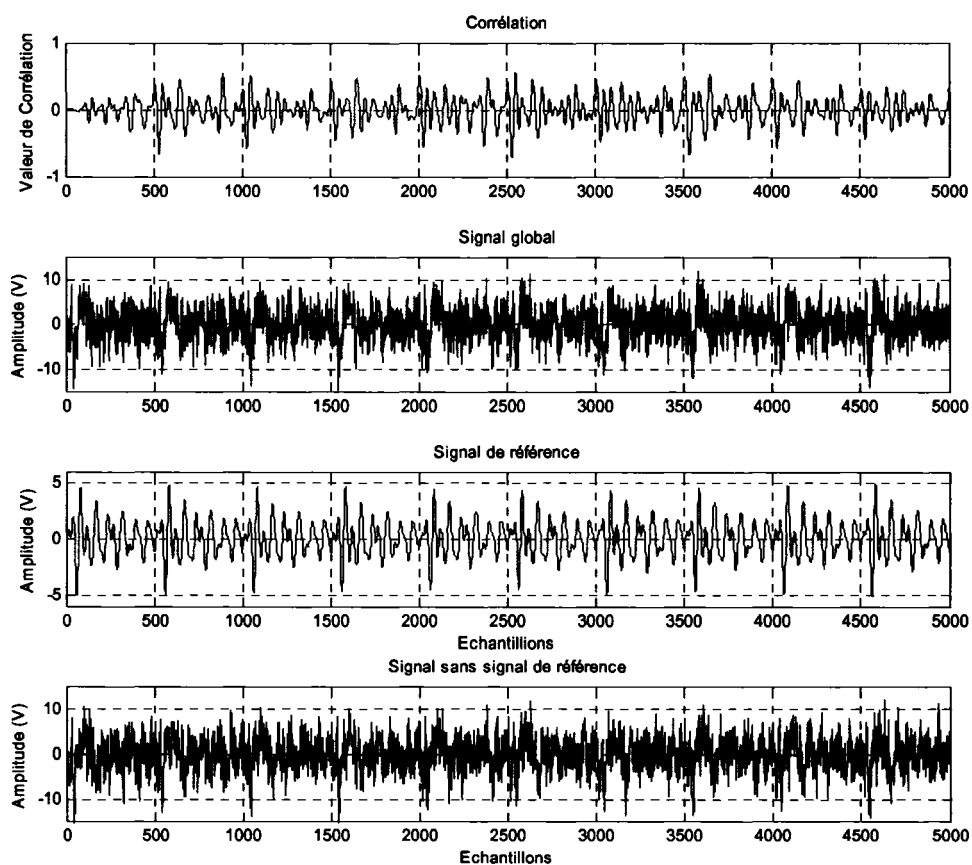


Figure 65 Résultats de corrélation d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence

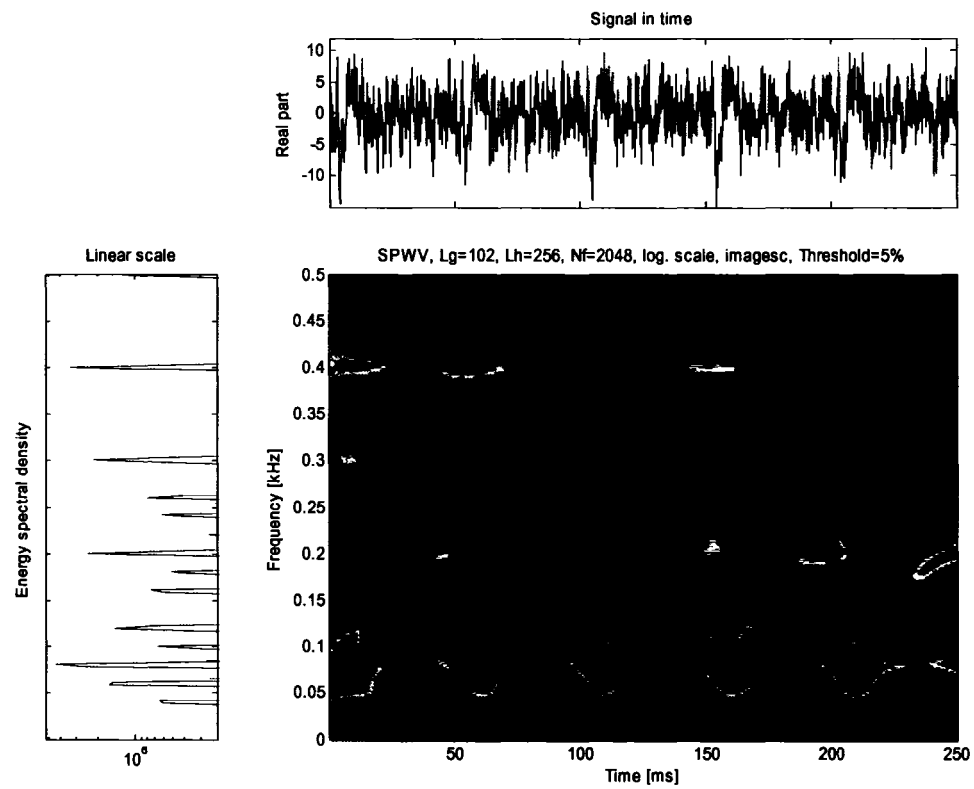


Figure 66 Résultats de la distribution temps-fréquence d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence.

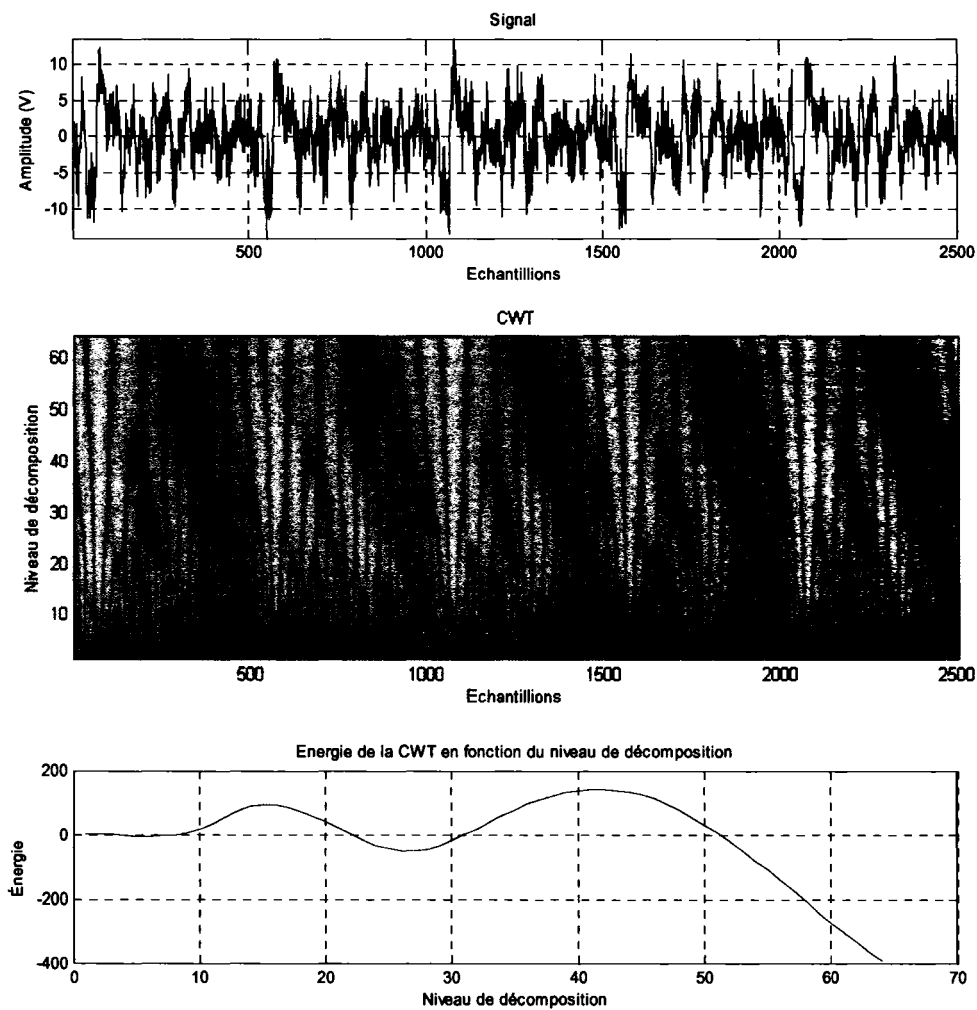


Figure 67 Résultats de la distribution CWT d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence

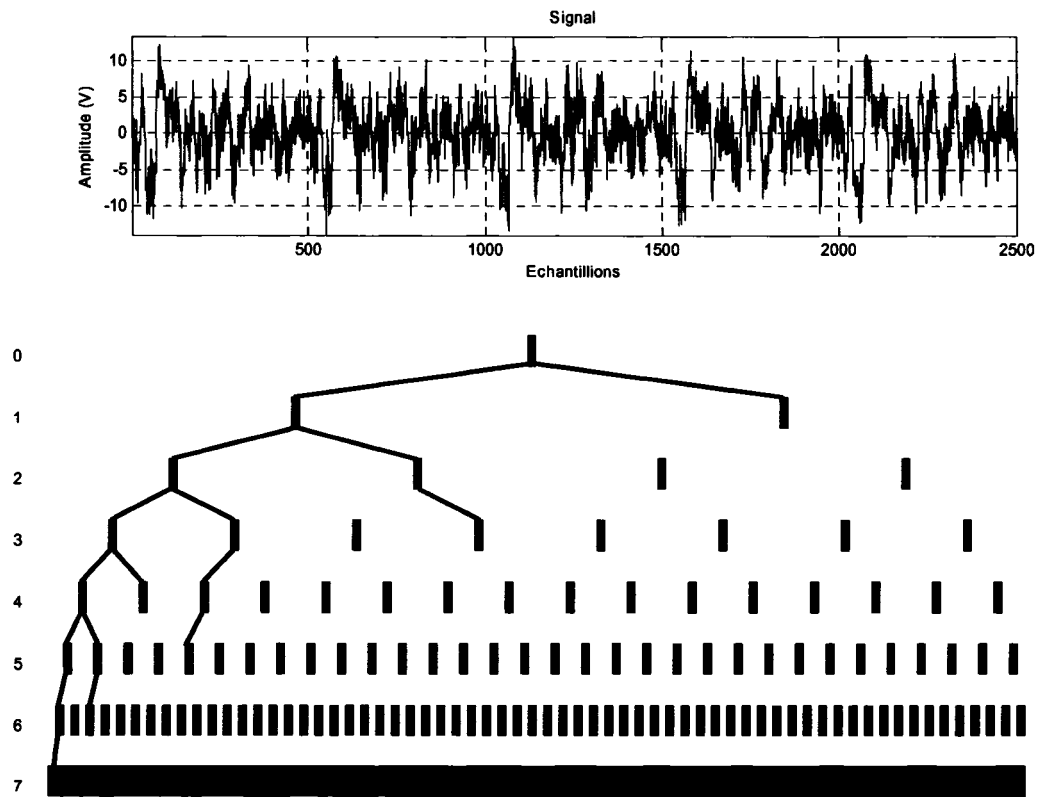


Figure 68 Résultats de la décomposition par ondelettes d'un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence

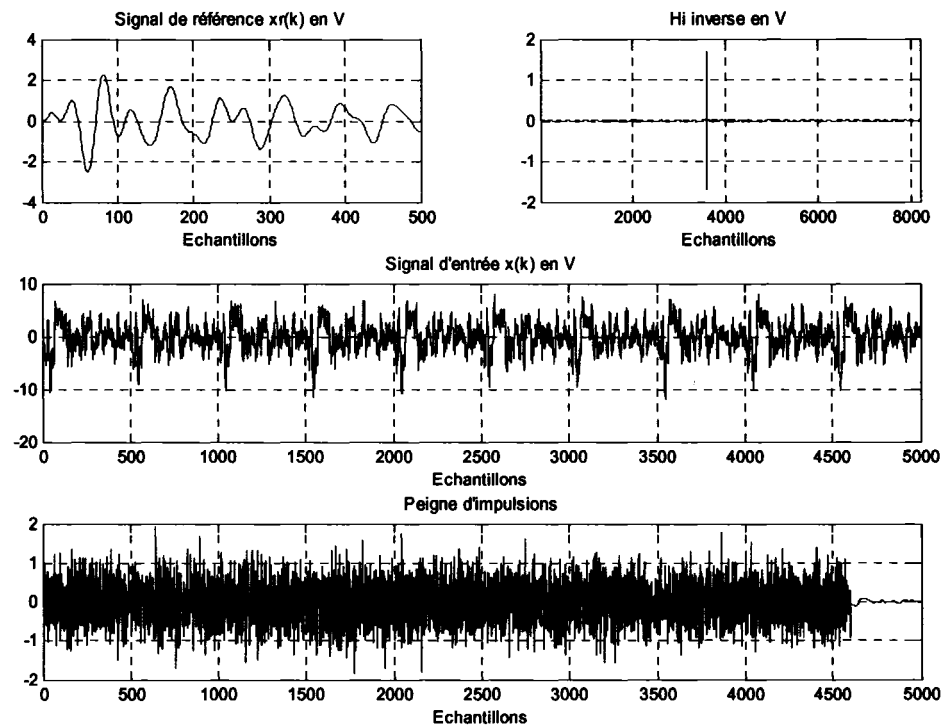


Figure 69 Résultats du filtrage temporel des signaux appliqué à un signal de 4 sources, 5 fréquences, avec bruit aléatoire, sans la source référence

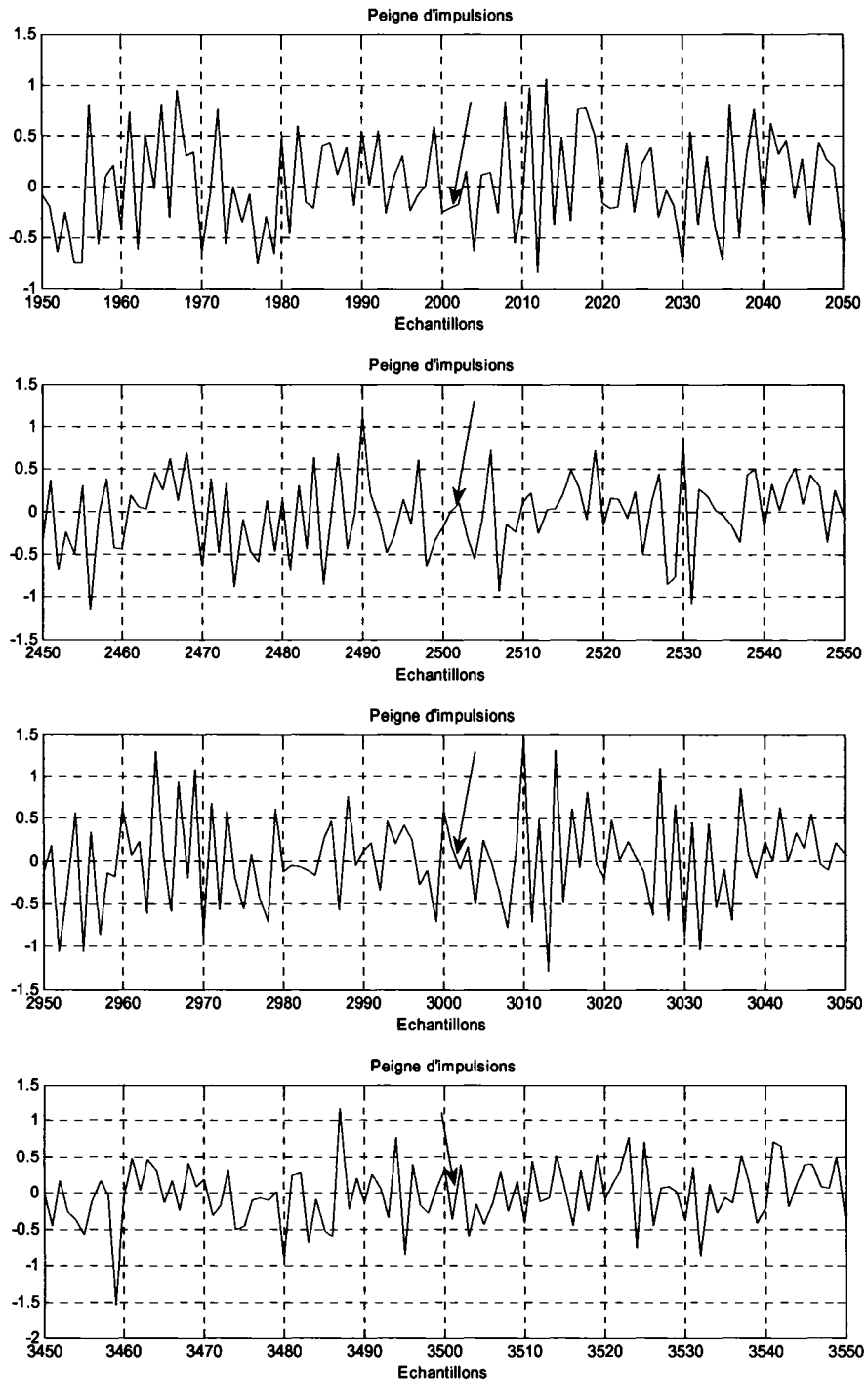


Figure 70 Valeur des impulsions à différents endroits en l'absence de la source de référence

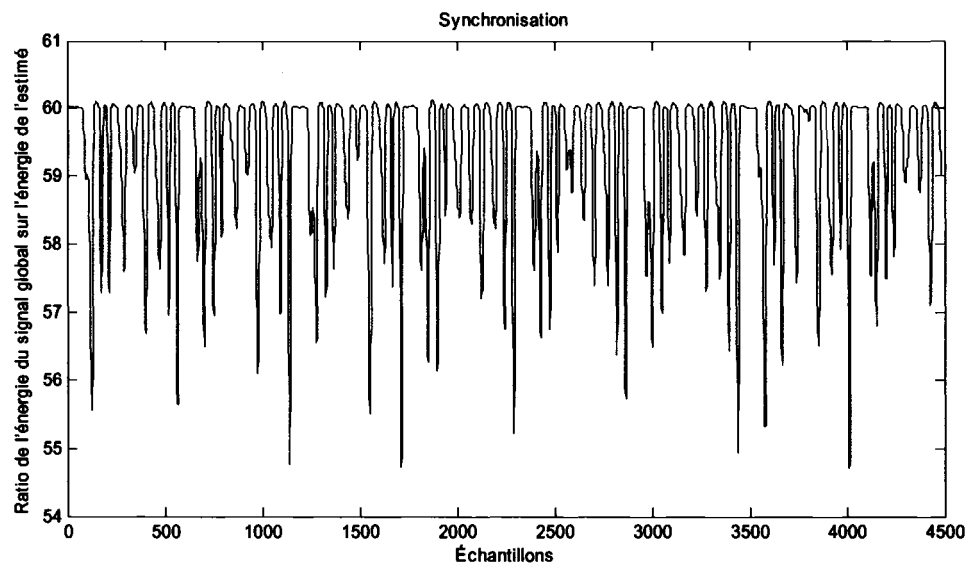


Figure 71 Évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre dans le cas d'absence de la source de référence

4.2.3 Conclusion globale

Ce chapitre a permis de voir comment réagissent les différentes méthodes de reconnaissance vis à vis des signaux ayant des caractéristiques variables. Le contenu des signaux est passé de simple source, simple fréquence à multiples sources, multiples fréquences. Les impacts ont été simultanés ou non. Un bruit aléatoire a même été ajouté afin de diminuer le rapport signal sur bruit.

La corrélation a démontré de bonnes aptitudes pour la reconnaissance du signal de référence dans plusieurs cas. Elle fut moins performante lorsque le signal global était composé de simples sinusoïdes décroissantes, ayant de la difficulté à les distinguer entre elles. Son niveau d'erreur, dans les meilleurs cas, se situait sous les 3dB. Dans les pires cas, l'erreur pouvait atteindre les 6 dB. Elle fut incapable de distinguer l'absence

de la source de référence lors de l'étape 8. Pour ces raisons, cette méthode de reconnaissance ne sera pas retenue pour les validations à l'aide des bancs d'essai.

La distribution temps-fréquence Wigner-Ville a démontré de bonnes aptitudes pour la reconnaissance dans les cas où les impacts des sources ne sont pas simultanés. Dans les cas où les impacts sont simultanés, ses performances sont nettement insuffisantes, l'erreur de reconnaissance atteignant les 5 dB. Elle fut incapable de distinguer l'absence de la source de référence lors de l'étape 8. Pour ces raisons, cette méthode de reconnaissance ne sera pas retenue pour les validations à l'aide des bancs d'essai.

Les méthodes utilisant les ondelettes, autant la distribution continue que l'arbre de décomposition, se sont avérées les moins performantes de toutes. Leur performance fut également décevante même avec les signaux simples. Pour ces raisons, ces méthodes de reconnaissance ne seront pas retenues pour les validations à l'aide des bancs d'essai.

La méthode utilisant le filtrage temporel s'est avérée la plus performante de toutes celles utilisées. Les erreurs de reconnaissance n'ont pas dépassé 3 dB, peu importe la composition des signaux. C'est la seule à avoir pu distinguer l'absence de la source de référence à l'étape 8. Pour ces raisons, c'est cette dernière qui sera utilisée lors des validations à l'aide des bancs d'essai.

CHAPITRE 5

VALIDATION EXPÉRIMENTALE À L'AIDE D'UN BANC D'ESSAI GÉNÉRANT DES IMPACTS MÉCANIQUES RÉPÉTITIFS

Parmi les méthodes de reconnaissance, quelques une ont démontré un certain potentiel lors de la validation à l'aide de signaux simulés (chapitre 4). Parmi ces méthodes, la plus prometteuse est celle utilisant le filtrage temporel des signaux. La démarche utilisée pour valider cette méthode de reconnaissance sera la suivante. Dans un premier temps, les signaux utilisés seront décrits et caractérisés. Ensuite, dans un deuxième temps, et pour chacun des signaux à valider, la méthode de reconnaissance sera utilisée afin d'évaluer la contribution de la source de référence dans le signal global. Mais avant de faire ces validations, le premier banc d'essai utilisé pour obtenir les signaux expérimentaux sera décrit.

5.1 Description du banc d'essai

Pour cette validation, un premier banc d'essai pouvant générer des impacts contrôlés a été conçu. Ce banc d'essai est aussi appelé générateur d'impacts. La figure 72 montre le générateur d'impacts. L'idée derrière ce banc était de concevoir un système mécanique pouvant reproduire, de façon contrôlée, le même genre de source de bruit que le système d'entraînement par chenille. Il fallait pouvoir générer des impacts répétitifs et synchronisés. Également, il fallait pouvoir générer les impacts des sources de façon individuelle de manière à savoir quel serait le signal de la source de référence seule. Cette information est impossible à obtenir avec la plupart des systèmes mécaniques réels. Des plaques rectangulaires ont été choisies comme sources d'impact parce qu'en modifiant leurs dimensions il est possible de contrôler le contenu fréquentiel du rayonnement acoustique.



Figure 72 Banc d'essai pour la validation expérimentale

Le générateur d'impact est composé de 5 disques, centrés sur un arbre, pouvant être munis de butées. Ces butées entrent en contact avec des plaques (figure 73), générant ainsi les impacts voulus. Sur ce banc d'essai, plusieurs paramètres peuvent être contrôlés. La vitesse de rotation est contrôlée à l'aide d'un moteur électrique à fréquence variable. La longueur et l'épaisseur des plaques sont choisies en fonction de l'expérimentation voulue. L'interférence entre la plaque et la butée, qui détermine le déplacement imposé lors de l'impact, peut être ajustée selon les besoins. La position des butées sur les disques (9 positions possibles divisant également la périphérie du disque) détermine le décalage temporel entre les impacts des différentes sources. Il est également possible de choisir la quantité de plaque (source) lors de l'expérimentation.

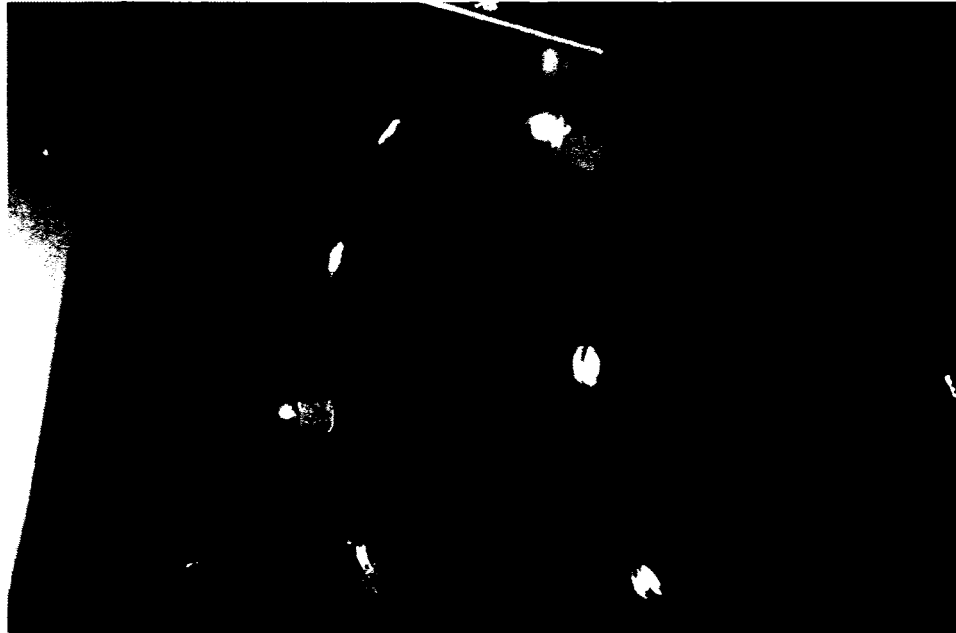


Figure 73 Impact de la butée sur une plaque

5.2 Description et caractérisation des signaux

Les sources de bruit utilisées pour les validations de ce chapitre s'effectueront sont des plaques d'acier de longueur variable. Le tableau XIII décrit les différentes sources utilisées pour les validations. Toutes les plaques ont une épaisseur de 1,6 mm et une largeur de 59 mm.

Ces différentes sources (ou plaques), lors des mesures, étaient excitées par les impacts répétitifs des butées. Ainsi, pour un signal global ayant 2 sources, il y avait la plaque de référence et la plaque #2 d'installées. Les différents essais ont été effectués à une vitesse de rotation de 1536 RPM et il y avait un impact par tour. Pour ces paramètres et avec une fréquence d'échantillonnage de 12 800 Hz, chaque impact est défini par 500 échantillons (0,039 seconde entre chaque impact). Un microphone était placé au dessus et au centre du montage. Ce microphone sert à capter le signal global.

Le signal de référence a été obtenu en utilisant un marteau d'impact sur la plaque de la source de référence. La figure 74 montre la distribution temps-fréquence (SWVD) de cet impact. La figure 75 montre la SWVD d'un impact d'une butée sur cette même plaque. Les ressemblances entre ces différents signaux et leur distribution sont fortes. Les figures 76 à 78 montrent les SWVD des autres sources. Sur ces figures, il est possible de voir les distinctions entre les différentes sources.

Tableau XIII

Description des différentes sources utilisées pour les validations

Source	Longueur de la plaque (mm)	Amplitude du signal (dB)
1 (référence)	59	59,7
2	90	56,1
3	95	56,4
4	115	62,3

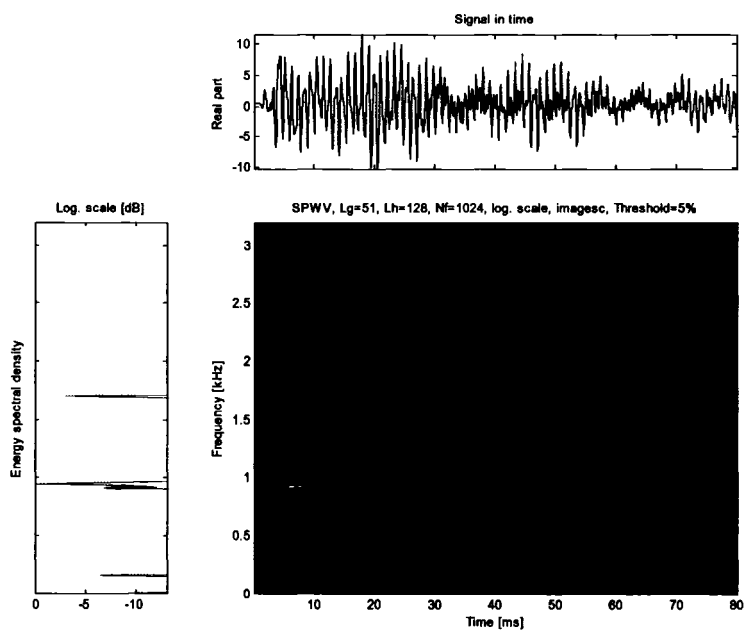


Figure 74 SWVD de l'impact du marteau sur la plaque de référence

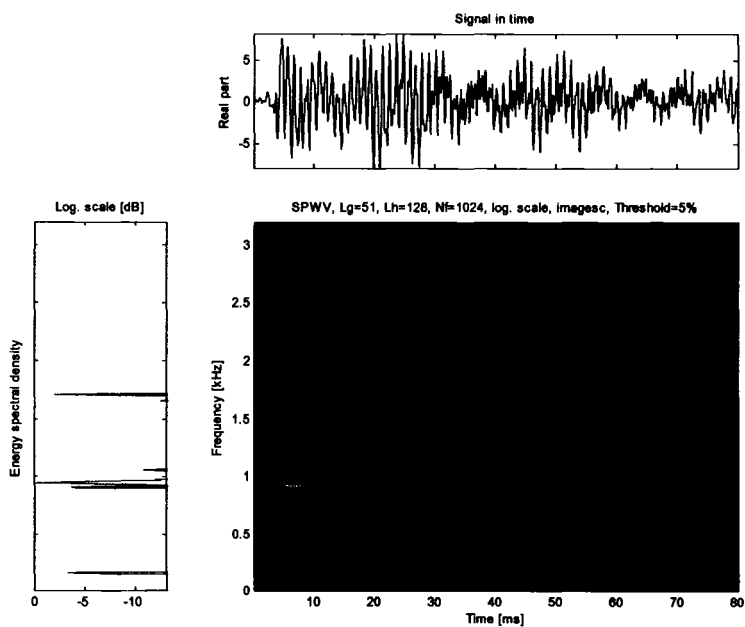


Figure 75 SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de référence

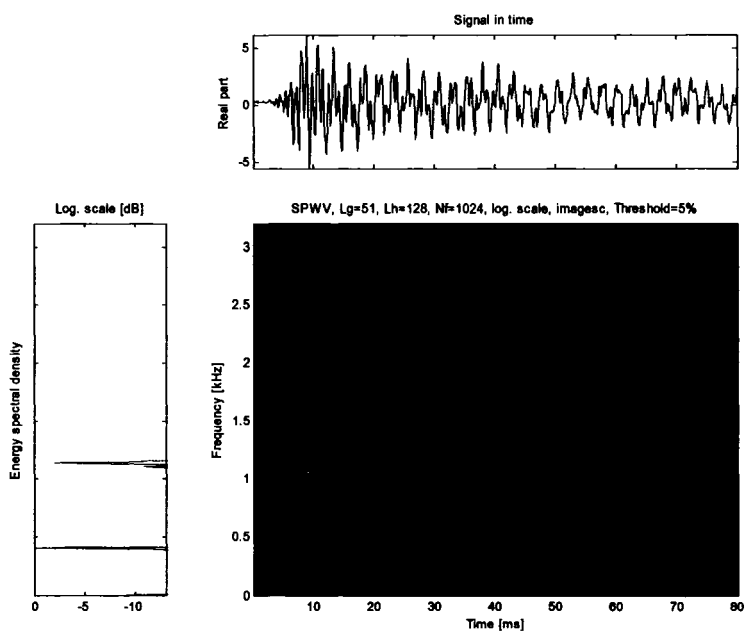


Figure 76 SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de la source 2

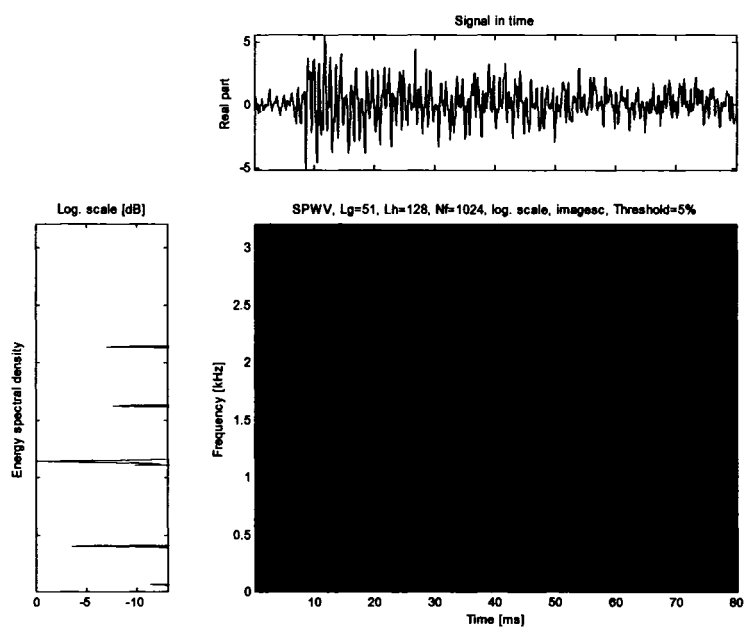


Figure 77 SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de la source 3

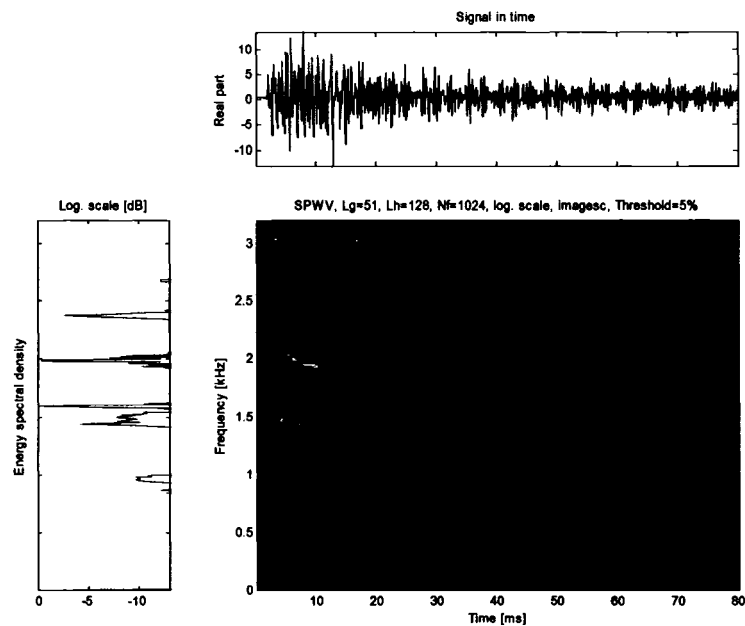


Figure 78 SWVD de l'impact d'une butée sur la plaque de la source 4.

5.3 Validation des méthodes de reconnaissance

Les validations se feront à l'aide de 6 signaux. Ces signaux sont :

- 1- Source de référence seule,
- 2- Source de référence et la source 2, impacts non simultanés,
- 3- Source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés,
- 4- Source de référence et la source 2, impacts simultanés,
- 5- Source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés,
- 6- Sources 2, 3 et 4, impacts simultanés, sans la source de référence.

Pour chacun des signaux, il y aura un SWVD afin de les caractériser et de voir l'évolution entre eux. La méthode de reconnaissance utilisant le filtrage temporel sera utilisée afin d'estimer la contribution de la source de référence dans le signal global.

5.3.1 Signal avec la source de référence seule

Le premier signal contient seulement la source de référence (voir figure 79). Le but de cet exercice est de voir si le signal de référence, obtenu à l'aide d'un marteau d'impact, permet d'évaluer le signal de la source de référence, obtenu avec les impacts des butées sur la plaque. La figure 80 montre l'évolution ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé, la synchronisation entre les signaux se fait à l'échantillon 265 et aux multiples de 500 suivants (265, 765, 1265, ...). La figure 81 montre le résultat de la reconnaissance à l'aide d'un filtre temporel. Les valeurs des impulsions, aux endroits où les signaux sont synchronisés, varient autour de 0.6 ce qui fait que l'énergie de l'estimé est de 60,9 dB. L'énergie de la source de référence est de 59,7 dB. L'erreur ici est donc de 1,2 dB.

Ces résultats permettent de conclure que le signal de référence, obtenu avec le marteau, est représentatif de la source de référence excitée par les butées.

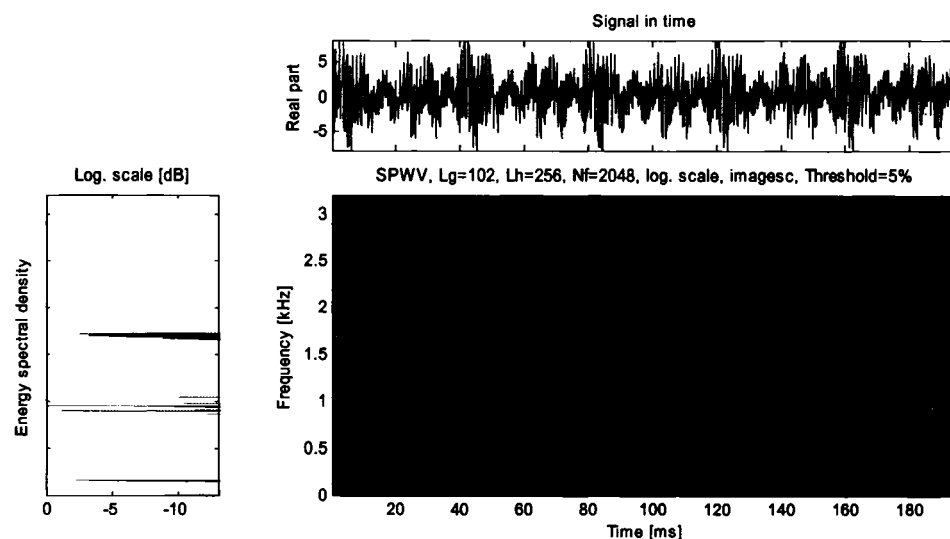


Figure 79 SWVD du signal avec la source de référence seule

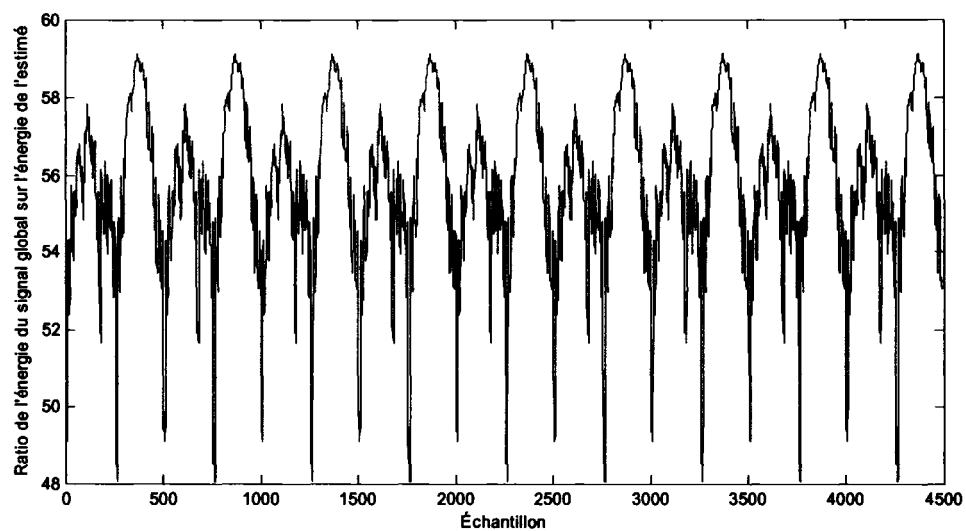


Figure 80 Évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé

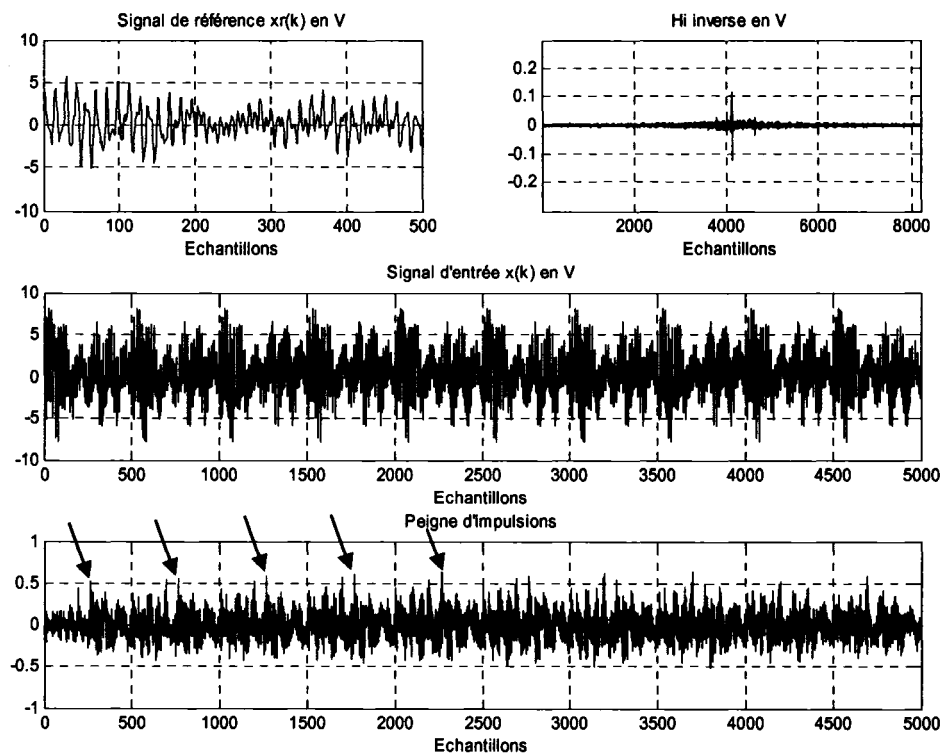


Figure 81 Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence seule en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

5.3.2 Signal avec la source de référence et la source 2, impacts non simultanées

Le 2^{ème} signal contient la source de référence et la source 2 (voir figure 82). Ces 2 sources n'ont pas d'impact simultané. L'énergie du signal global est de 61,2 dB. Le but de cet exercice est de voir si le signal de référence permet d'identifier la source de référence dans le signal global en présence d'une autre source. La figure 83 montre le résultat de la reconnaissance. Les valeurs des impulsions, aux endroits où les signaux sont synchronisés, varient entre 0,6 et 0,7 ce qui fait que l'énergie de l'estimé est de 61,2 dB. L'énergie de la source de référence est de 59,7 dB. L'erreur ici est donc de 1,5 dB.

Ces résultats permettent de conclure que la méthode de reconnaissance permet d'identifier la source de référence dans le signal global.

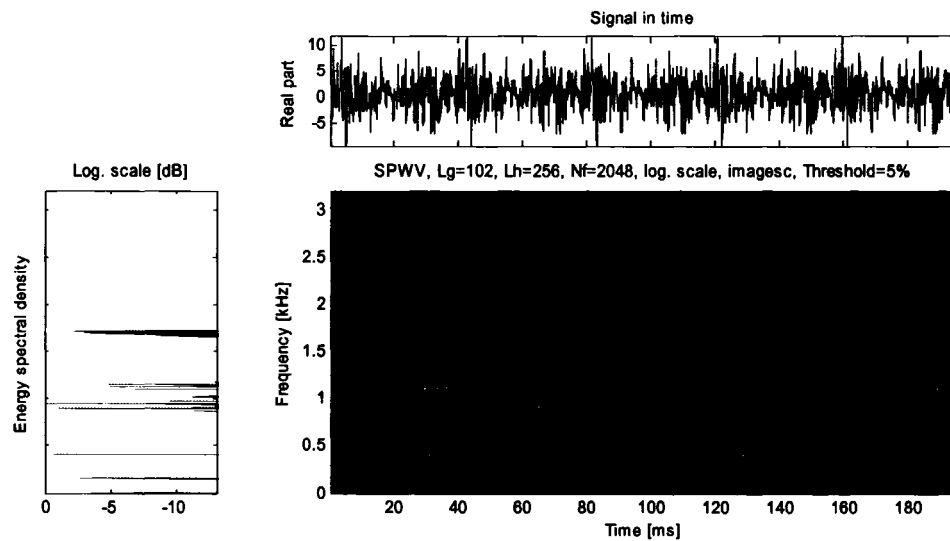


Figure 82 SWVD du signal avec la source de référence et la source 2, impacts non simultanés

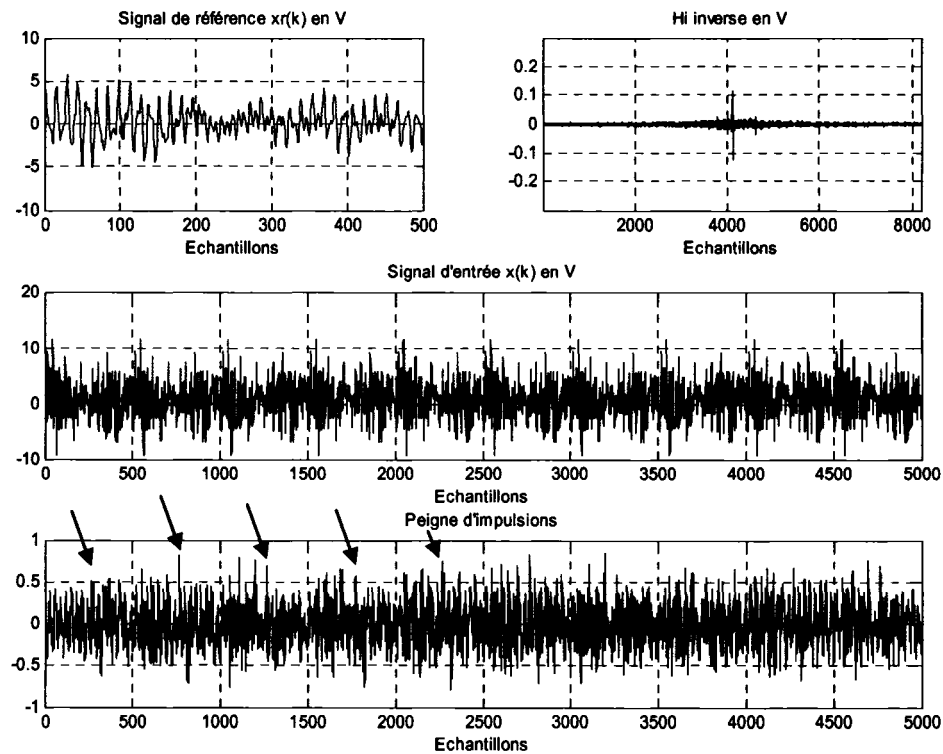


Figure 83 Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et la source 2, impacts non simultanés, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

5.3.3 Signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés

Le 3^{ème} signal contient la source de référence et les sources 2, 3 et 4 (voir figure 84). Ces sources n'ont pas d'impact simultané. L'énergie du signal global est de 64,5 dB. Le but de cet exercice est de voir si le signal de référence permet d'identifier la source de référence dans un signal global contenant plusieurs sources. La figure 85 montre le résultat de la reconnaissance. Les valeurs des impulsions, aux endroits où les signaux sont synchronisés, varient entre 0,6 et 0,7 ce qui fait que l'énergie de l'estimé est de

61,1 dB. L'énergie de la source de référence est de 59,7 dB. L'erreur ici est donc de 1,4 dB.

Ces résultats permettent de conclure que la méthode de reconnaissance permet d'identifier la source de référence dans le signal global.

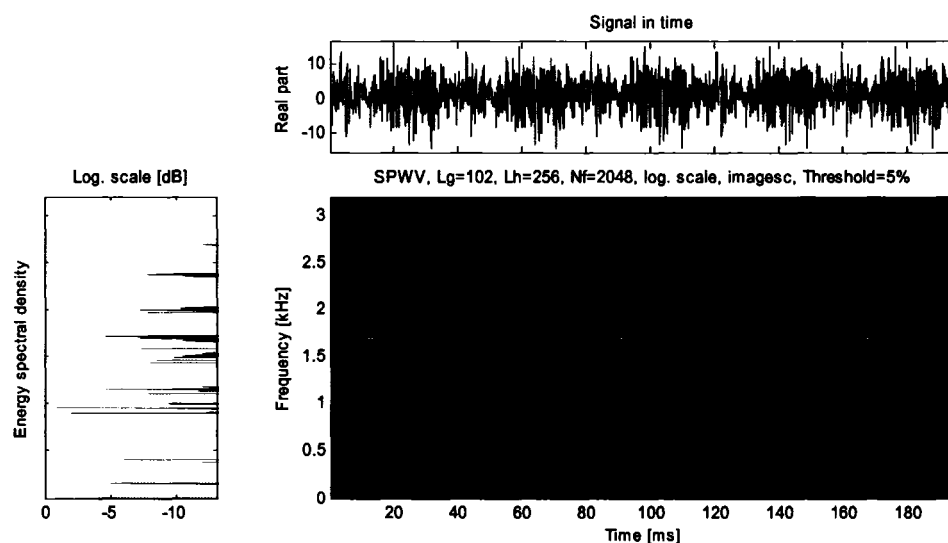


Figure 84 SWVD du signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés

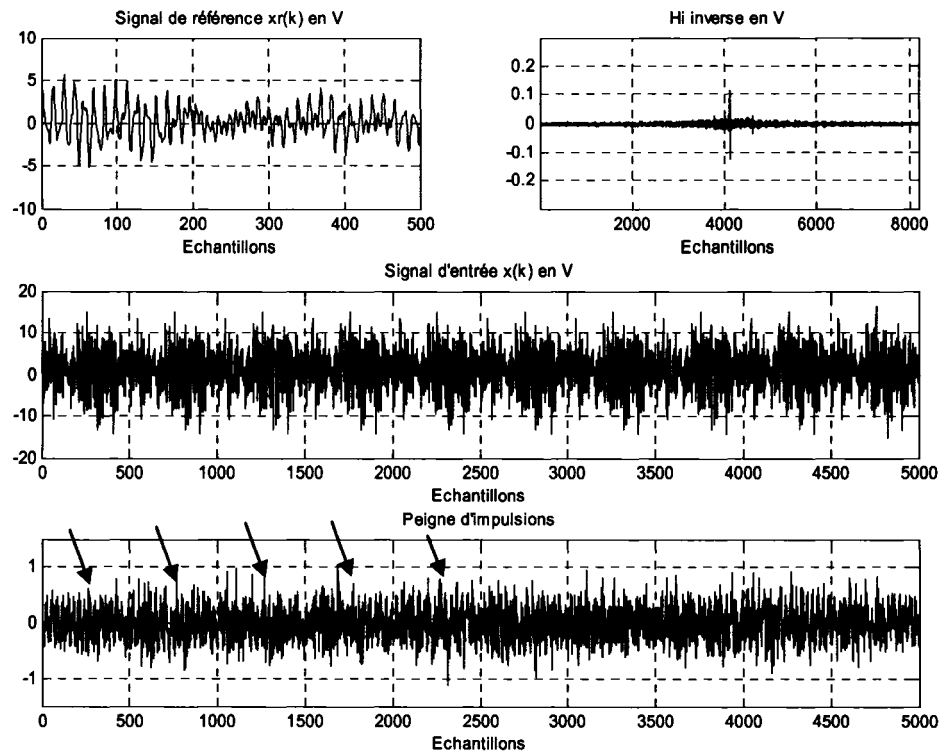


Figure 85 Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts non simultanés, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

5.3.4 Signal avec la source de référence et la source 2, impacts simultanés

Le 4^{ème} signal contient la source de référence et la source 2 (voir figure 86). Ces sources ont des impacts simultanés. L'énergie du signal global est de 61,4 dB. Le but de cet exercice est de voir si le signal de référence permet d'identifier la source de référence dans un signal global contenant une deuxième source avec des impacts simultanés. La figure 87 montre le résultat de la reconnaissance. Les valeurs des impulsions, aux endroits où les signaux sont synchronisés, varient entre 0,65 et 0,78 ce qui fait que l'énergie de l'estimé est de 61,6 dB. L'énergie de la source de référence est de 59,7 dB. L'erreur ici est donc de 1,9 dB.

Ces résultats permettent de conclure que la méthode de reconnaissance permet d'identifier la source de référence dans le signal global contenant une 2^{ème} source avec des impacts simultanés.

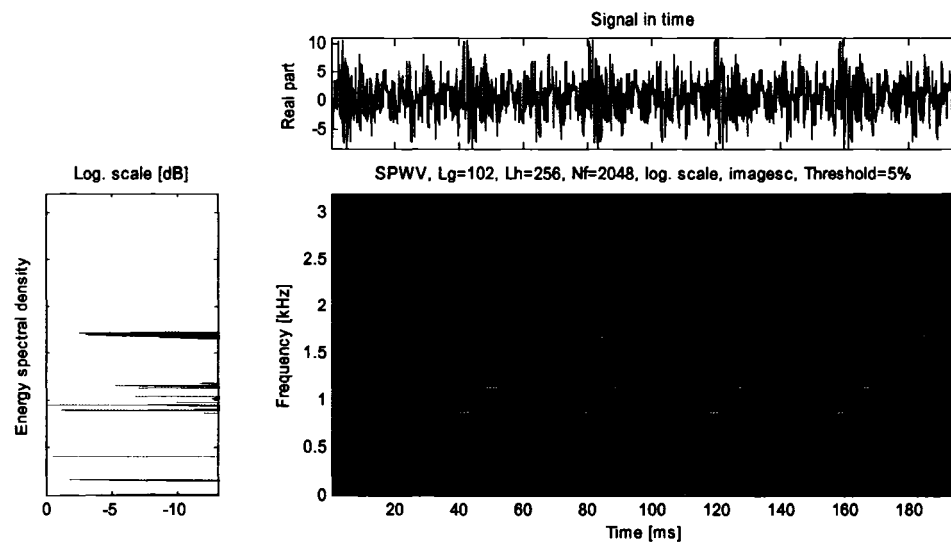


Figure 86 SWVD du signal avec la source de référence et la source 2, impacts simultanés

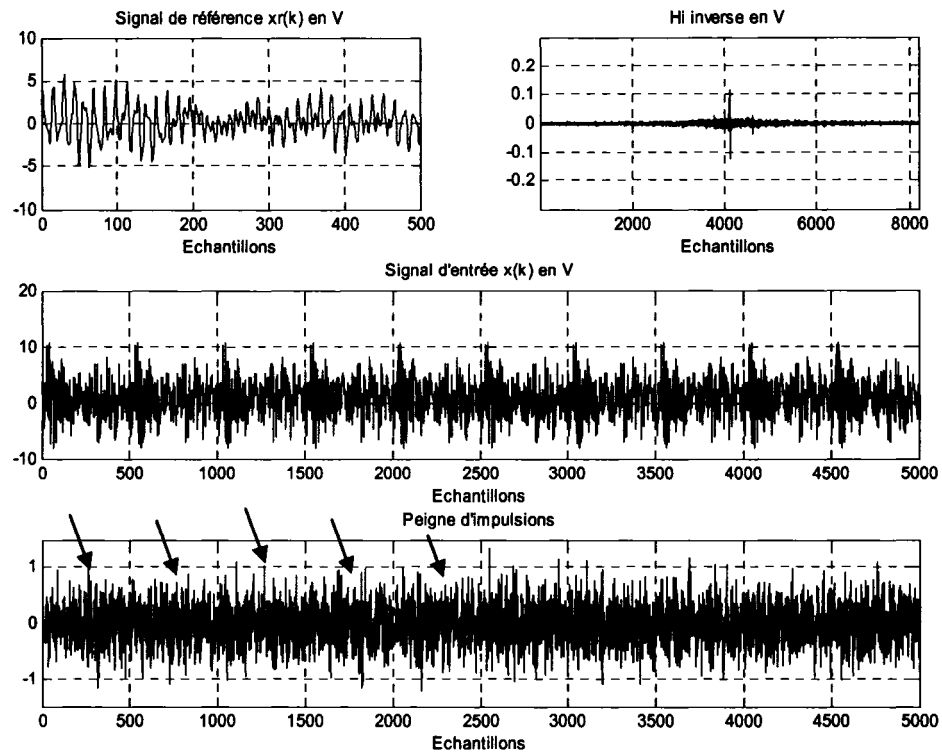


Figure 87 Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et la source 2, impacts simultanés, en utilisant le filtrage temporel des signaux (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

5.3.5 Signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés

Le 5^{ème} signal contient la source de référence et les sources 2, 3 et 4 (voir figure 88). Ces sources ont des impacts simultanés. L'énergie du signal global est de 65,1 dB. Le but de cet exercice est de voir si le signal de référence permet d'identifier la source de référence dans un signal global contenant plusieurs sources ayant des impacts simultanés. La figure 89 montre le résultat de la reconnaissance. Les valeurs des impulsions, aux endroits où les signaux sont synchronisés, varient entre 0,7 et 0,83 ce

qui fait que l'énergie de l'estimé est de 62.2 dB. L'énergie de la source de référence est de 59,7 dB. L'erreur ici est donc de 2,5 dB.

Ces résultats permettent de conclure que la méthode de reconnaissance permet d'identifier la source de référence dans le signal global contenant plusieurs sources avec des impacts simultanés.

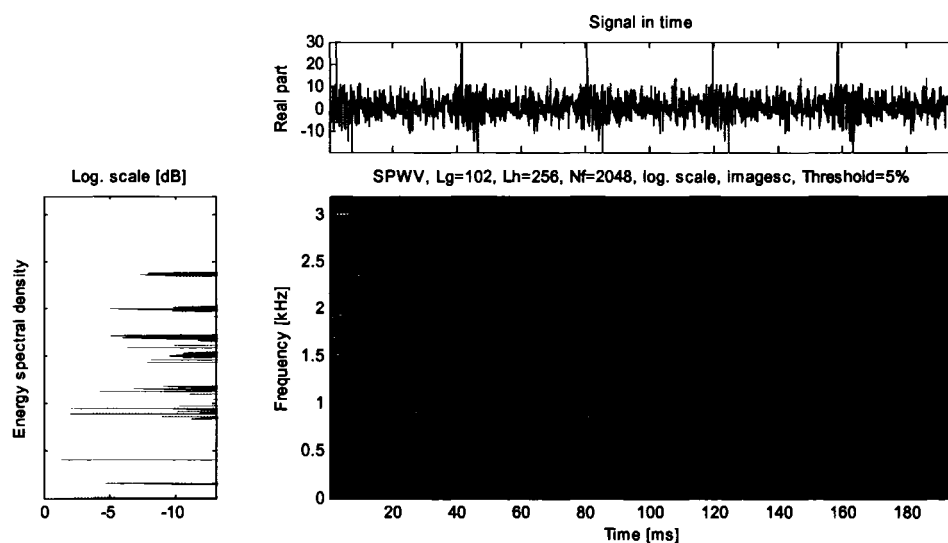


Figure 88 SWVD du signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés

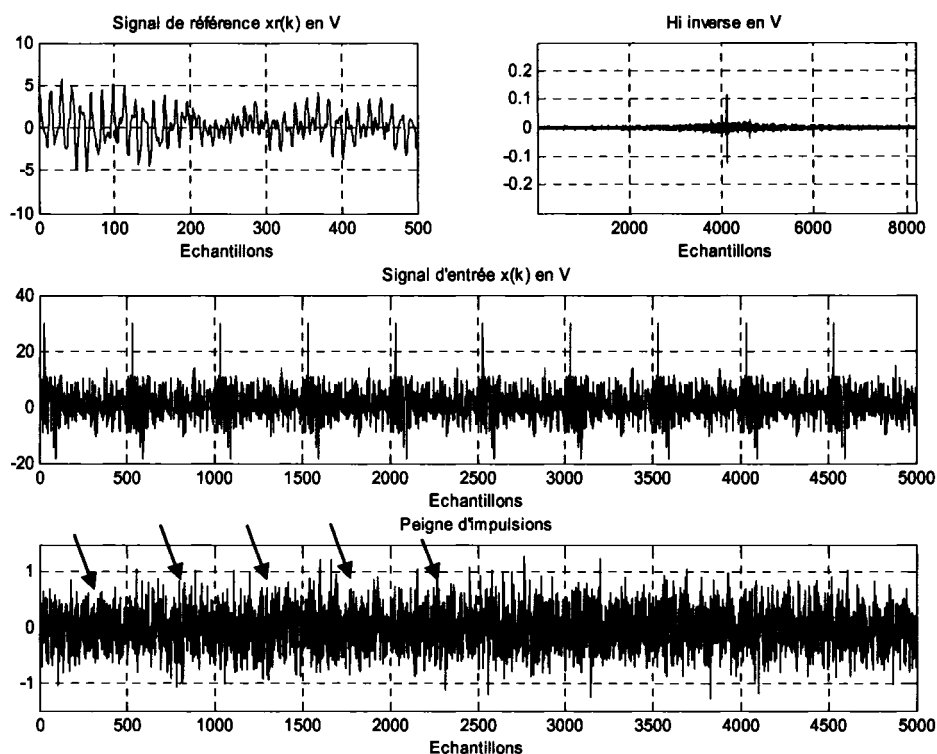


Figure 89 Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec la source de référence et les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

5.3.6 Signal avec les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés

Le 6^{ième} signal ne contient pas la source de référence mais seulement les sources 2, 3 et 4 (voir figure 90). Ces sources ont des impacts simultanés. L'énergie du signal global est de 63,5 dB. Le but de cet exercice est de voir si le signal de référence va reconnaître l'absence de la source de référence dans le signal global. La figure 91 montre le résultat de la reconnaissance. Les valeurs des impulsions, aux endroits où les signaux devraient être synchronisés, varient entre -0,3 et 0,25 ce qui fait que l'énergie de l'estimé est de 47,6 dB. L'énergie du signal global est de 63,5. La méthode de reconnaissance estime donc la contribution de la source de référence à 16 dB en dessous du niveau global.

L'énergie estimée ne peut être négligée par rapport au niveau global, un écart de plus de 20 dB aurait été plus acceptable.

Ces résultats permettent de conclure que la méthode de reconnaissance peut estimer un niveau d'énergie non négligeable à une source non présente. Le niveau estimé reste faible mais pourrait être significatif dans certains cas.

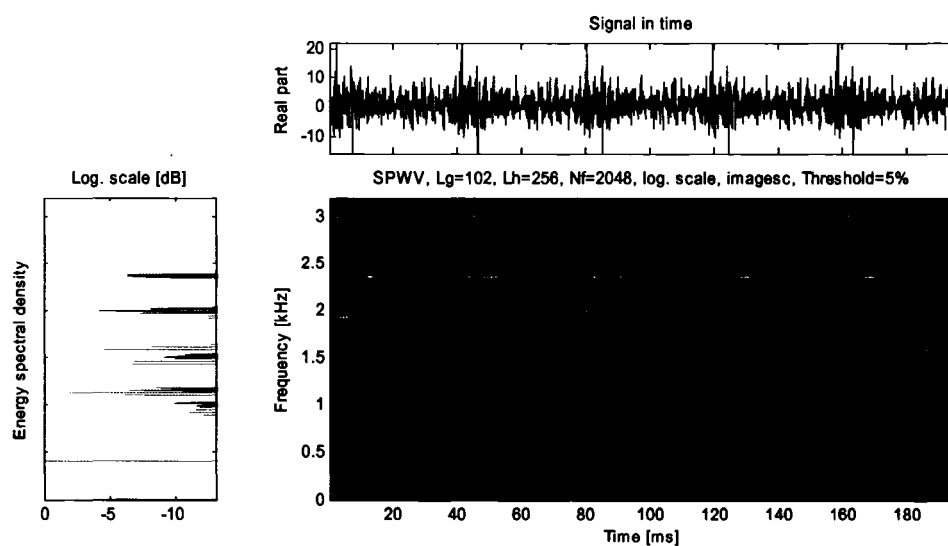


Figure 90 SWVD du signal avec les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés

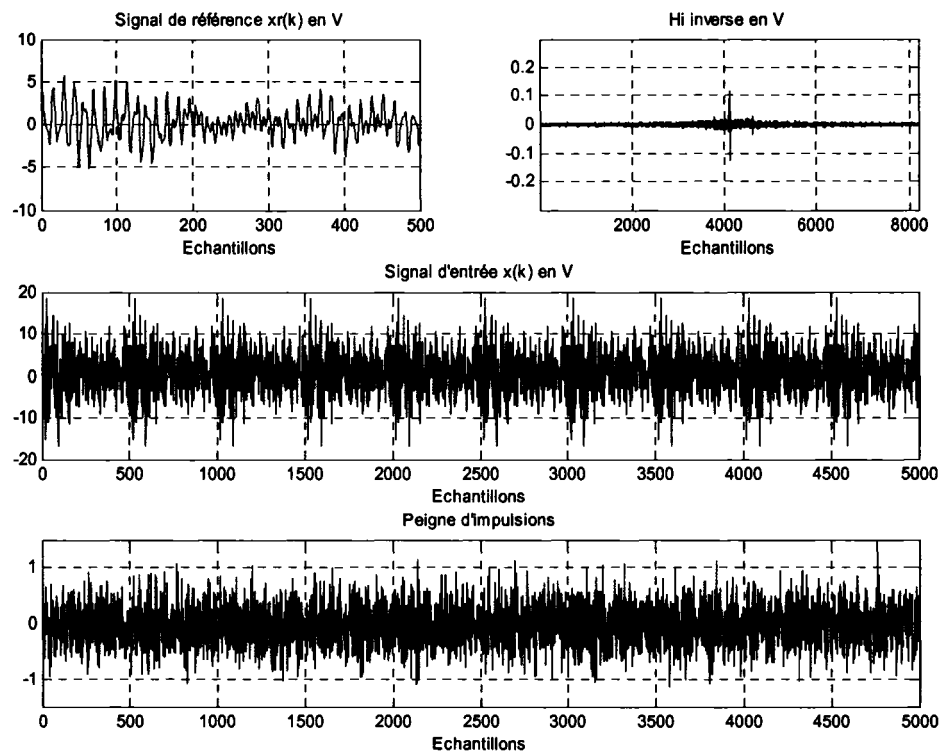


Figure 91 Reconnaissance du signal de référence dans le signal avec les sources 2, 3 et 4, impacts simultanés, en utilisant un filtrage temporel

5.4 Conclusion

Pour cette première série de validation à l'aide de signaux expérimentaux, un banc d'essai a été spécifiquement conçu à cette fin. Ce banc d'essai pouvait reproduire, de façon contrôlé, le même genre de source de bruit que le système d'entraînement par chenille. Par la suite, il a été démontré que le signal obtenu en excitant une source à l'aide d'un marteau d'impact était très similaire à celui obtenu lors du fonctionnement normal de cette source. Cette étape était cruciale car la reconnaissance des signaux s'appuyait sur cette hypothèse.

Lors des validations, il a été démontré que le filtrage de signaux temporels peut servir de méthode de reconnaissance. Les erreurs obtenues sont toutes inférieures à 2,5 dB. Par contre, il a été démontré que cette méthode de reconnaissance peut induire en erreur dans le cas où la source de référence est absente. Cette erreur demeure cependant faible, avec un niveau résiduel d'environ 16 dB.

CHAPITRE 6

VALIDATION EXPÉRIMENTALE À L'AIDE D'UN SYSTÈME MÉCANIQUE D'ENTRAÎNEMENT PAR CHAÎNE

Ce chapitre fait suite au 2 précédents traitant de la validation des méthodes de reconnaissance. Après avoir validé les méthodes de reconnaissances à l'aide de signaux simulés et des signaux expérimentaux contrôlés, cette section tentera de la valider à l'aide de signaux provenant d'un système mécanique. Ce système mécanique a été conçu dans le but d'avoir des sources de bruit ressemblant le plus possible aux sources de bruit du système d'entraînement par chenille sans en avoir la complexité. Il s'agit d'un système d'entraînement par chaîne avec roues dentées. Les maillons de la chaîne ont beaucoup de similitudes avec les crampons de la chenille et les roues dentées ressemblent au barbotin. Autre similitude, les 2 systèmes génèrent des bruits d'impacts répétitifs et synchronisés.

La validation suivra le processus décrit à la section 3.1 et se déroulera comme suit :

- 1- Dans un premier temps, le système mécanique sera décrit et caractérisé, la source de référence sera identifiée;
- 2- Dans un deuxième temps, la source de référence sera caractérisé afin d'obtenir un signal de référence représentatif;
- 3- Dans un troisième temps, la méthode de reconnaissance sera appliquée et l'énergie de la source de référence sera calculée.

Dans ce cas, on ne peut avoir l'énergie de la source de référence seule, une technique de fractionnement du système sera utilisée. Pour ce faire, le système mécanique sera opéré avec et sans la source de référence et par soustraction, l'énergie de la source de référence sera obtenue. Ensuite il sera possible de comparer le niveau d'énergie estimé et celui obtenu en soustrayant le niveau mesuré sans la source de référence du niveau mesuré avec la source de référence et les autres sources.

6.1 Définition du système mécanique

Le système mécanique conçu est un ventilateur à entraînement par chaîne. Il est représenté sur la figure 92. Il est composé de 6 éléments :

- 1- un moteur électrique,
- 2- une première roue dentée,
- 3- une chaîne,
- 4- un tendeur de chaîne,
- 5- une deuxième roue dentée (pignon),
- 6- une hélice.

La source de référence est le tendeur de chaîne. Les raisons motivant ce choix sont :

- 1- le tendeur est facile à enlever ou à modifier sans changer le comportement du système, en réajustant la tension dans la chaîne en déplaçant le moteur,
- 2- le tendeur est bruyant à cause des impacts qu'il reçoit,
- 3- la fréquence des impacts sur le tendeur est la même que celle des impacts sur les dents des 2 engrenages.

Ces deux derniers critères permettent une analogie avec le système d'entraînement pas chenille. Le fait que l'on puisse enlever le tendeur sans changer le comportement du système va faciliter la validation de la méthode.

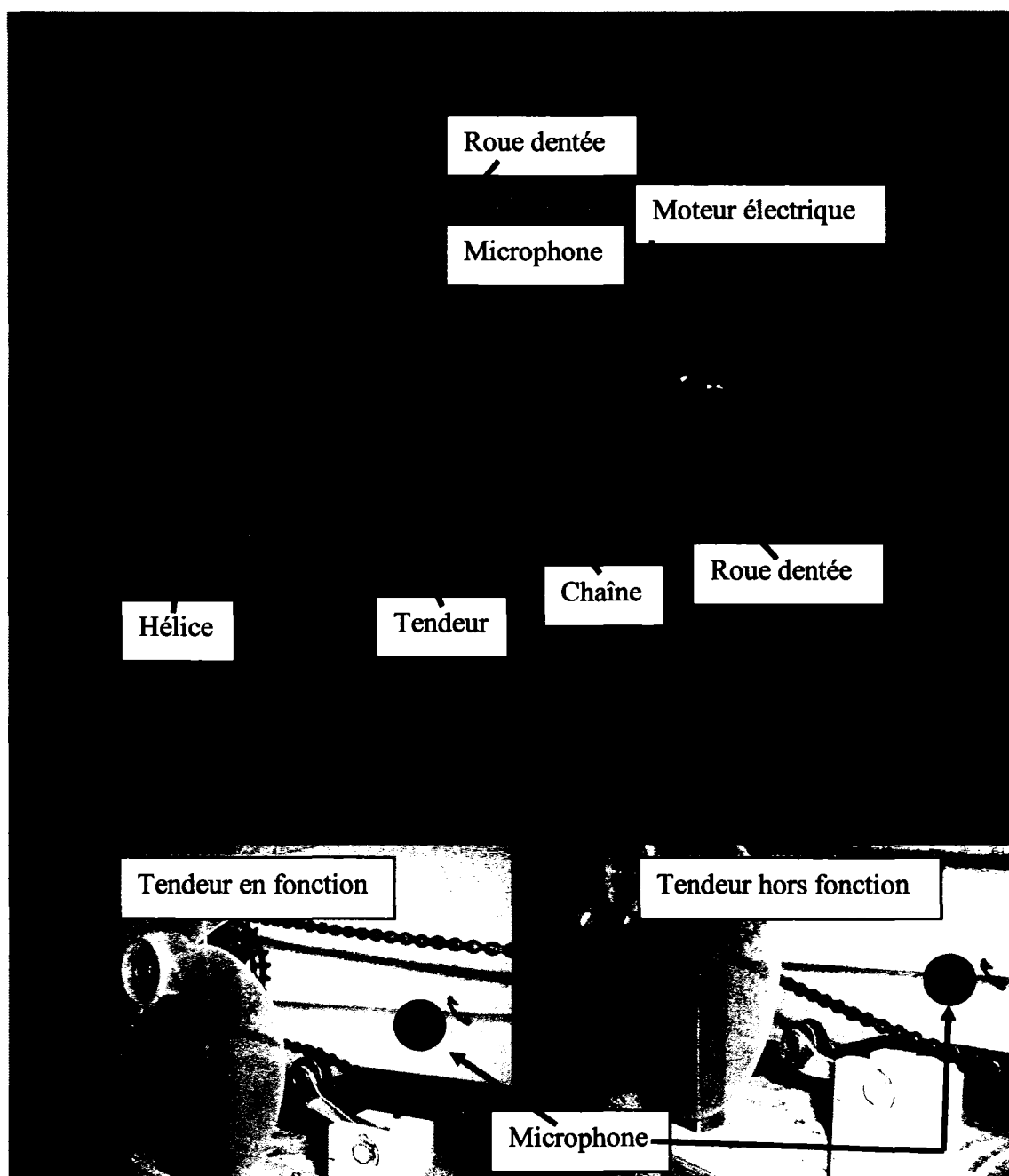


Figure 92 Système mécanique pour l'application de la méthode

6.2 Caractérisation de la source à reconnaître

Cette section vise à caractériser le tendeur de chaîne de façon à obtenir un signal de référence représentatif du bruit émis par ce dernier en fonctionnement normal. La méthode choisie pour la caractérisation est le marteau d'impact. Ce choix est justifié par le mécanisme même de génération du bruit de ce système : le tendeur est soumis à des impacts répétitifs par les maillons de la chaîne. Le bruit du tendeur vient donc d'impacts, ce que tentera de reproduire le marteau d'impact.

Les figures 93 et 94 montrent une distribution temps-fréquence Wigner-Ville de 2 signaux d'impact obtenus à l'aide d'un marteau d'impact. Les traces temporelles et les distributions temps-fréquence permettent de conclure que ces signaux sont similaires.

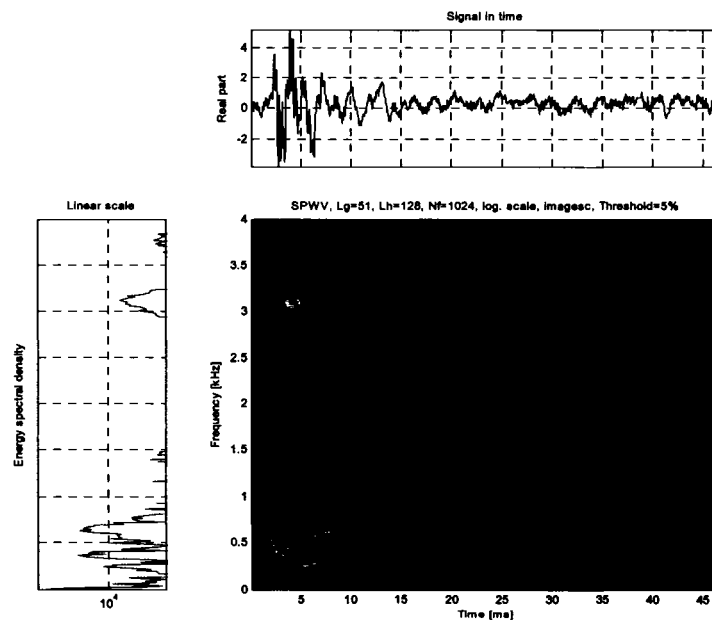


Figure 93 Distribution temps-fréquence, spectre et trace temporelle d'un impact généré avec un marteau d'impact sur le tendeur

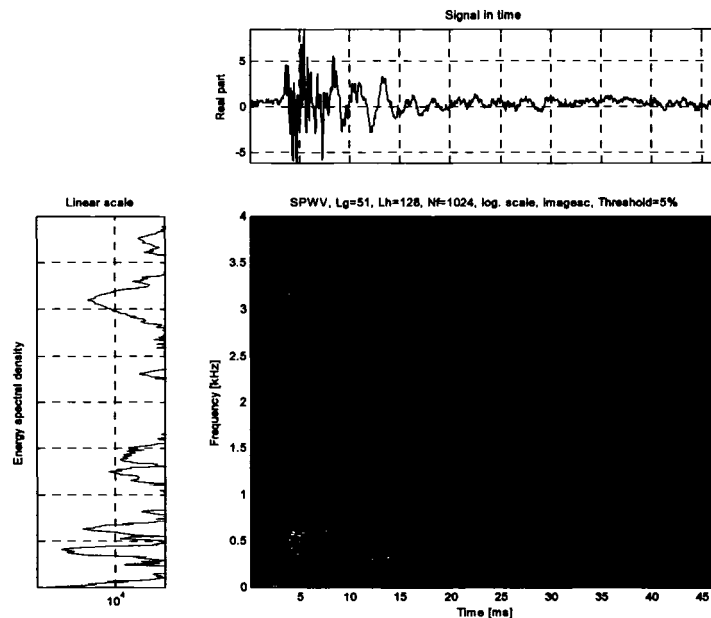


Figure 94 Distribution temps-fréquence, spectre et trace temporelle d'un second impact généré avec un marteau d'impact sur le tendeur

6.3 Reconnaissance

Cette section tentera d'identifier le signal de référence dans le signal global en utilisant le filtrage de signaux temporels à l'aide de l'inverse de la réponse impulsionnelle. Tout d'abord, la prise de mesure sera décrite. Ensuite suivra la section où la définition du signal de référence sera présentée. Pour terminer, la reconnaissance de signaux à l'aide du filtrage de signaux temporels sera appliquée pour différentes vitesses d'opération.

6.3.1 Prise de mesure

Les mesures ont été faites de la façon suivante :

Le moteur électrique démarre à une vitesse de 150 tours par minute. Comme la roue dentée principale a 40 dents, il y a donc 6000 impacts à la minute ou 100 impacts par seconde (les impacts sont provoqués par les maillons de la chaîne qui entrent en contact avec les dents des roues ou le tendeur). La fréquence d'échantillonnage pour ces essais était de 25 600 Hz, donc 256 échantillons entre chaque impact (0,010 seconde entre les impacts). Ensuite, sa vitesse est graduellement amenée à la vitesse maximale de 400 RPM, générant 267 impacts par seconde. Pour cette vitesse de rotation, il y avait 96 échantillons entre chaque impact (0,0038 seconde entre les impacts). La vitesse du moteur est enregistrée en même temps que les signaux de pression acoustique. La pression acoustique est mesurée près du tendeur (voir figure 92) afin de maximiser le rapport signal sur bruit pour l'identification du tendeur. La fréquence d'échantillonnage est de 12 800 Hz. Pour l'identification, le signal global correspondra à un segment du signal à une vitesse donnée.

6.3.2 Définition du signal de référence

La figure 95 montre une section du signal global à une vitesse de 200 RPM (environ 133 impacts par seconde). Le signal de référence utilisé pour la reconnaissance est celui montré à la figure 93. La même méthode que celle décrite à la section 4.2.2.6 sera utilisée pour trouver la position de la synchronisation entre la source de référence dans le signal global et l'inverse de la réponse impulsionnelle lors de la convolution.

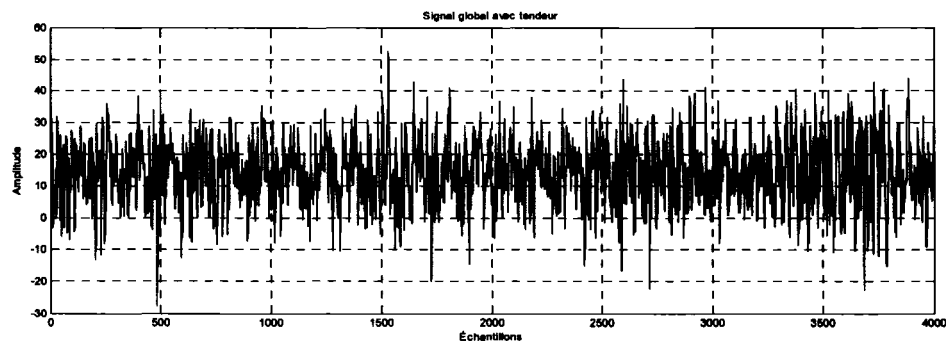


Figure 95 Trace temporelle du signal global avec tendeur pour une vitesse de rotation de 200 RPM

La figure 96 montre l'évolution du ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre. Les minima (flèches noires) sur cette figure représentent les positions où l'impact du signal de référence est synchronisé avec les impacts du signal global. Les coefficients du filtre adaptatif ont aussi servi à déterminer ces minima.

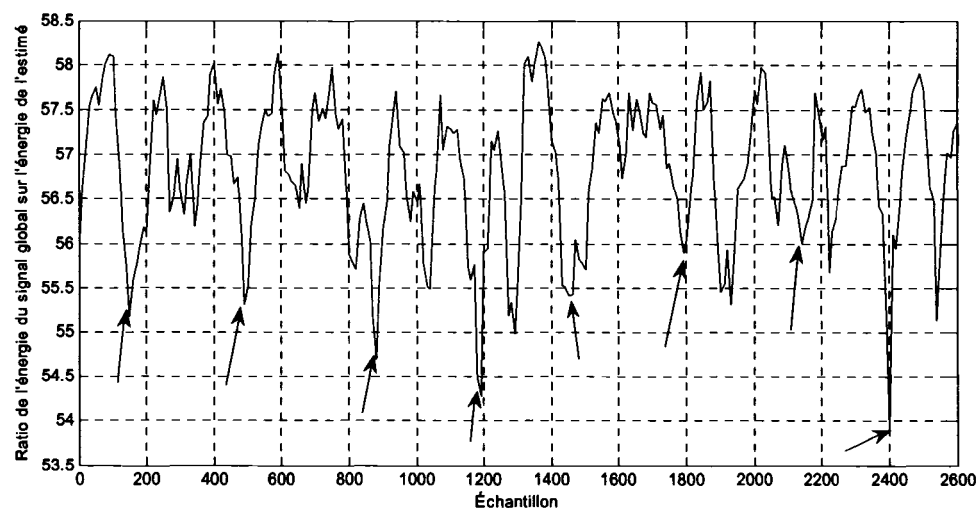


Figure 96 Ratio de l'énergie du signal global sur l'énergie de l'estimé en fonction du décalage de la fenêtre pour une vitesse de 200 RPM

6.3.3 Application du filtrage des signaux temporels

Le système mécanique est utilisé à plusieurs vitesses de rotation, comme décrit à la section 6.3.1. Pour la reconnaissance, des segments de l'acquisition globale ont été choisies afin d'avoir des vitesses quasi constantes. Les vitesses choisies sont les suivantes :

Tableau XIV

Vitesse de rotation du moteur lors des mesures sur le système mécanique d'entraînement par chaîne

	Vitesse de rotation (RPM)	Impacts à la seconde
1	200	133
2	230	153
3	270	180
4	295	196
5	345	230
6	375	250
7	400	267

L'énergie du système mécanique, avec et sans tendeur, est présentée au tableau suivant. La dernière colonne de ce tableau présente la valeur de l'énergie du tendeur obtenue par soustraction des 2 autres colonnes.

Tableau XV

Énergie du système mécanique, avec et sans tendeur en fonction de la vitesse de rotation

Vitesse de rotation (RPM)	Énergie avec tendeur (dB)	Énergie sans tendeur (dB)	Énergie du tendeur (dB)
200	81,8	78,7	78,9
230	82,5	79,2	79,8
270	83,2	80,2	80,2
295	83,7	81,0	80,4
345	84,6	82,2	80,9
375	86,3	83,7	82,8
400	87,5	84,2	84,8

La première reconnaissance se fait à la vitesse de 200 RPM. La figure 97 montre les résultats obtenus. Les valeurs des impulsions aux endroits désignés avec la synchronisation varient entre 9,9 et 13,5. L'énergie de l'estimé du tendeur est de 81,7 dB. Afin de pouvoir valider cette valeur, l'énergie du tendeur a été calculée en soustrayant le niveau mesuré avec tendeur de celui mesuré sans tendeur. Ce calcul donne 78,9 dB comme énergie du tendeur, soit une différence de 2,8 dB.

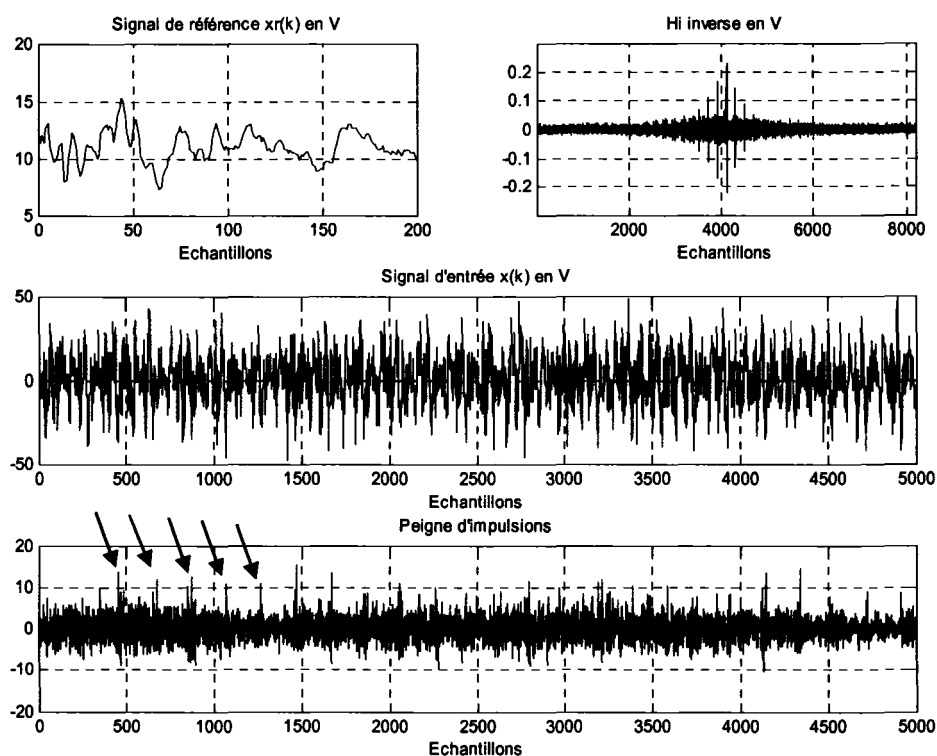


Figure 97 Reconnaissance du signal de référence dans le signal global pour une vitesse de rotation de 200 RPM, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

Pour les autres vitesses de rotation, il faut répéter le processus de construction du signal de référence, comme décrit à la section 6.3.2. Un autre cas est présenté en détail, celui pour une vitesse de rotation de 270 RPM. La figure 98 montre les résultats obtenus avec un filtre temporel pour une vitesse de rotation de 270 RPM. Les valeurs des impulsions aux endroits désignés avec la synchronisation varient entre 10,7 et 14,6. L'énergie de l'estimé du tendeur est de 82,1 dB. Le calcul de l'énergie du tendeur donne 80,2 dB, soit une différence de 1,9 dB.

La figure 99 montre les niveaux d'énergie, estimés et calculés, du tendeur pour les autres vitesses de rotation du moteur électrique.

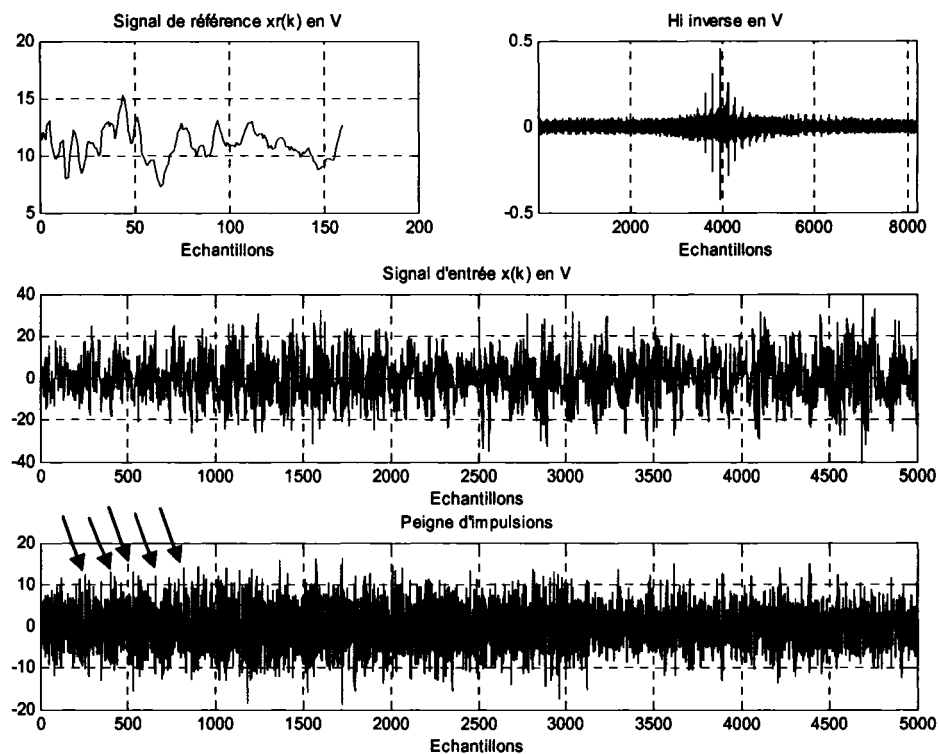


Figure 98 Reconnaissance du signal de référence dans le signal global pour une vitesse de rotation de 270 RPM, en utilisant un filtrage temporel (les 5 premiers impacts sont identifiés par les flèches)

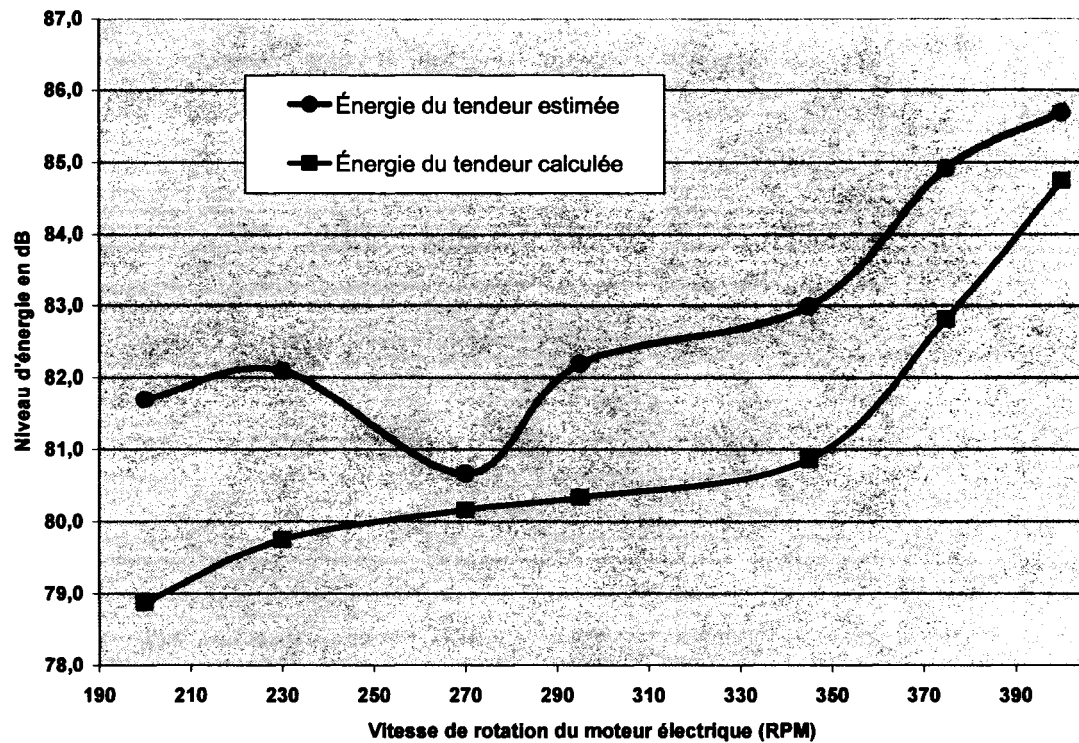


Figure 99 Niveau d'énergie du tendeur, estimé et calculé

6.4 Conclusion sur l'application de la méthode à un système mécanique

Lors de la validation de la méthode de reconnaissance avec des signaux expérimentaux venant de sources contrôlées (Chapitre 5), l'erreur dans l'estimé de la contribution de la source référence est d'au plus 2,5 dB (ou 25%). Ici, avec des signaux provenant de mesures sur un système mécanique moins contrôlé, l'erreur est d'au plus 2,8 dB (ou 30%). Ce résultat est considéré satisfaisant étant donné que l'énergie de la source cherchée (tendeur de chaîne) ne pouvait pas être obtenue directement comme dans le cas du premier banc d'essai mais par soustraction de deux mesures (avec et sans tendeur) qui ne diffèrent que par environ 3 dB, ce qui, combiné à l'hypothèse que le bruit des éléments autres que le tendeur est resté le même dans les deux cas de mesure,

donne une plus grande incertitude de mesure dans ce deuxième banc d'essai que dans le cas du premier banc d'essai.

De façon globale, l'erreur obtenue est suffisamment faible pour conclure que le filtrage de signaux temporel peut être utilisé comme méthode de reconnaissance pour quantifier la source de référence dans le système global. Mais pour obtenir ces résultats, il faut avoir une méthode permettant de localiser temporellement les impacts provenant de la source de référence. En effet, sans les courbes d'optimisation du ratio de l'erreur sur l'estimé il aurait été très difficile d'utiliser les graphes des impulsions afin de prédire l'énergie de la source de référence.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le travail présenté dans cette thèse a porté sur l'identification et la caractérisation des sources de bruit impulsionnelles, répétitives et synchronisées, dans les systèmes mécaniques complexes. La problématique industrielle de départ a été définie autour d'un système d'entraînement par chenille. Cette problématique a soulevé plusieurs questions autour de la reconnaissance des sources de bruit. Ce sont ces questions qui sont à la base de ce projet de doctorat qui se veut plus une réponse aux questions de reconnaissance des sources de bruit en général qu'une méthode permettant d'identifier les sources d'une chenille.

Avant de pouvoir développer une méthode de reconnaissance adéquate à ce genre de problématique, il a fallu analyser les méthodes actuelles. Les méthodes classiques d'identification de sources ont été étudiées en faisant ressortir leurs forces et leurs lacunes. Ainsi, leur inadéquation à la problématique présentée a pu être montrée. Dans le cas de la méthode inverse, il a fallu procéder à une validation à l'aide de sources monopolaires avant de voir son inadéquation.

Une nouvelle technique de reconnaissance a donc été développée. Les 3 étapes de cette nouvelle technique de reconnaissance ont été expliquées à l'aide d'un exemple, soit un système d'entraînement par chenille. Ces étapes sont :

- 1- Caractérisation du système mécanique,
- 2- Caractérisation des sources,
- 3- Reconnaissance des sources.

Les outils nécessaires à leur mise en œuvre ont été présentés. Pour l'étape de la reconnaissance, plusieurs méthodes semblaient offrir un potentiel intéressant. Ces méthodes sont :

- 1- La corrélation,

- 2- Les distributions temps-fréquence Wigner-Ville,
- 3- Les ondelettes,
- 4- Le filtrage de signaux temporels.

Dans une première phase de validation, des signaux simulés ont été utilisés pour déterminer les performances respectives de ces 4 outils. Seulement le filtrage de signaux temporel a été retenu pour la deuxième phase de validation.

Dans une deuxième phase de validation, des signaux expérimentaux ont été utilisés. Ces signaux expérimentaux provenaient d'un premier banc d'essai spécifiquement construit dans le but de simuler des sources de bruit représentatives de la problématique, soit des sources impulsionnelles, répétitives et synchronisées. L'objectif était d'avoir des signaux le plus représentatifs de la problématique. Cette phase de validation a permis de conclure que seul le filtrage de signaux temporels était adéquat pour cette application de reconnaissance.

Dans la troisième phase de validation, des signaux expérimentaux provenant d'un système mécanique d'entraînement par chaîne et roues dentées ont été utilisés. Ce système mécanique a été conçu dans le but d'avoir des sources de bruit ressemblant le plus possible aux sources de bruit du système d'entraînement par chenille sans en avoir la complexité : les maillons de la chaîne ont beaucoup de similitudes avec les crampons de la chenille, les roues dentées ressemblent au barbotin et les 2 systèmes génèrent des bruits d'impacts répétitifs et synchronisés.

Une source de ce système mécanique a été choisie comme référence, le tendeur de chaîne. La validation a été faite de la façon suivante :

- 1- Le niveau d'énergie du tendeur a été estimé, pour différentes vitesses d'impact, à l'aide de la nouvelle technique de reconnaissance.

- 2- Le niveau d'énergie du système sans le tendeur a été mesuré en modifiant le système mécanique de façon à enlever le tendeur sans changer la tension dans la chaîne.
- 3- Le niveau d'énergie du tendeur a été calculé en soustrayant le niveau mesuré sans tendeur du niveau mesuré avec tendeur.
- 4- Les niveaux d'énergie calculés et estimés ont été comparés.

Pour les différentes vitesses d'impact, la technique de reconnaissance a un niveau d'erreur variant en dessous de 3,0 dB, ces niveaux d'erreur obtenus à cette étape sont suffisamment faibles (compte tenu de l'incertitude sur la valeur déterminée par une méthode traditionnelle) pour conclure que le filtrage de signaux temporels à l'aide de l'inverse de la réponse impulsionnelle peut être utilisé comme méthode de reconnaissance de sources d'impact.

L'acquis principal de ce doctorat est le développement d'une méthode de reconnaissance d'une source impulsive répétitive parmi d'autres sources impulsives répétitives, toutes les sources étant synchronisées. La méthode développée est basée sur le filtrage de signaux temporels à l'aide de l'inverse de la réponse impulsionnelle visant à extraire l'énergie d'un signal impulsif dans un ensemble de signaux similaires. Les développements spécifiques qui ont été accomplis sont :

- la synchronisation des impacts du signal de référence avec les impacts du signal global par filtrage adaptatif RLS,
- l'utilisation du filtrage de signaux temporels à l'aide de l'inverse de la réponse impulsionnelle comme outils de reconnaissance de sources acoustiques dans un signal composite.

Même si le concept proposé a passé trois étapes de validation, la dernière étape de validation, qui se rapproche du cas industriel, est la plus délicate, principalement à cause des limites et de l'incertitude des méthodes alternatives à mettre en œuvre. Une

avenue dans les méthodes alternatives serait de ne pas enlever d'éléments au système complexe analysé mais de remplacer des éléments par des éléments silencieux de façon à ne pas modifier les paramètres du système. Par exemple, le tendeur de chaîne ne serait pas enlevé mais remplacé par un tendeur dans un matériau plus souple pour lequel les forces d'impact sont moindres et les roues dentées seraient aussi remplacées de façon similaire de manière à pouvoir faire fonctionner chaque élément d'origine seul dans le système complet et bien identifier la contribution sonore de chacun. Ceci pourrait être étendu au système complet de l'entraînement par chenille de la motoneige. Il s'agit là d'un gros défi, surtout technologique et économique, car il implique la production de plusieurs éléments du système dans un matériau ou des combinaisons de matériaux différents de ceux d'origine.

BIBLIOGRAPHIE

ANSI S1.35 – 1979a. Determination of sound power levels of noise sources : precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms.

ANSI S1.36 – 1979b. Determination of sound power levels of noise sources : survey method.

ANSI S1.34 – 1980. Determination of sound power levels of noise sources : Engineering methods for free field conditions over a reflecting plane.

ANSI S12.12 – 1992. American national standard engineering method for the determination of sound power levels of noise sources using sound intensity.

AS1217.5 – 1985a. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources : Engineering methods for free field conditions over a reflecting plane.

AS1217.6 – 1985b. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources : Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms.

AS1217.7 – 1985c. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources : survey method.

ASTM E1124 – 1986. Standard test method for field measurement of sound power level by the two surfaces method.

Bendat, J.S. et Piersol, A.G. (1966) *Measurement and analysis of random data*. New York, USA, John Wiley and Sons.

Bendat, J.S. et Piersol, A.G. (2000) *Random data, analysis and measurement procedures*. Toronto, Canada, John Wiley and Sons.

Beranek, L.L. (1971) *Noise and Vibration Control*. New York, USA, McGraw Hill.

Beranek, L.L. et Ver, I.L. (1992) *Noise and vibration control engineering, principles and applications*. New York, USA, Wiley-Interscience.

Bies, D.A. et Hansen, C.H. (1996) *Engineering Noise Control, Theory and Practice*, 2nd, London, UK, E&FN Spon.

Chiollaz, M. et Favre, B. (1993) *Engine Noise Characterisation With Wigner-Ville Time-Frequency Analysis*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 7(5), 375-400.

Crocker, M.J., et Ivanov, N.I. (1993) *Noise and vibration control in vehicles*. St-Peterburg, Russie, Interpublished Ltd.

Donavan, P.R. (1993) Sound-intensity measurement errors in the presence of large pressure to intensity ratios. SAE 951334, Noise and Vibration Conference.

Dumbacher, S.M. et al. (1995) *Source identification using acoustic array techniques*. SAE 951360, SAE Noise and Vibration Conference and Exposition.

Dumbacher, S.M. et Brown, D.L. (1996a) *Source imaging using acoustic inverse FRF array technique*. 14^{ième} International Modal Analysis Conference, Detroit, MI.

Dumbacher, S.M. et Brown, D.L. (1996b) *Source imaging of irregularly shaped surfaces using inverse FRF method*, Proc. of 21st International Seminar on Modal Analysis, Leuven, Belgium.

Dumbacher, S.M. et Brown, D.L. (1997) Practical considerations of the IFRF technique as applied to noise path analysis and acoustical imaging., 15^{ième} International Modal Analysis Conference.

Dumbacher, S.M. et Brown, D.L. (1998) *Evaluation of noise source ID using analytical FRFs*. 16^{ième} International Modal Analysis Conference.

Dumbacher, S.M. et al. (1999) *Practical aspects of making NAH measurements*, SAE 1999-01-1847, SAE Noise and Vibration Conference and Exposition.

Ehlbeck, J.M. et Schrader, D. (1989) *Analyzing pass-by noise using the FFT*. SAE 891146, Noise and Vibration Conference.

Fahy, F.J. (1989) *Sound Intensity*. London, UK. Elsevier Applied Science.

Flandrin, P. (1998) *Temps-fréquence*, 2^e édition. Paris, France, Hermès.

Goldman, S. (1991) *Vibration spectrum analysis, a practical approach*. New York, USA, Industrial Press Inc.

Huynh, Q.Q. et al. (1998) Classification of underwater mammals using feature extraction based on time-frequency analysis and BCM theory. IEEE Trans. On Signal Processing, 46(5), 1202-1207.

ISO 3745 – 1977. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources. Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms.

ISO 3746 – 1979. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources. Survey method employing an enveloping measurement surface over reflecting surface.

ISO 9614/1 – 1993. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Part I : Measurements at discrete points.

ISO 3744 – 1994a. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources. Engineering method employing an enveloping measurement surface in an essentially free field over reflecting plane.

ISO 9614/2 – 1994b. Acoustics : Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Part II : Scanning Method.

Jiang, J.K. et Whittlesey, M.W. (1989) *An analytical method of noise source identification using boundary element technique*. SAE 891152, Noise and Vibration Conference.

Levin, D. N. (2002) Representations of Sound that are Insensitive to Spectral Filtering and Parametrization Procedures. JASA, 111(5), 2257-2271.

Mason, A.S. et Bartoshesky, T.A. (1993) Development of a robotic sound intensity data acquisition system for powerplant testing., SAE 951359, Noise and Vibration Conference.

Matz, G. et Hlawatsch, F. (2003) Wigner distributions (nearly) everywhere: time-frequency analysis of signals, systems, random processes, signal spaces and frames. Signal Processing, 83, 1355-1378.

Maynard, J.D. et al. (1985) Nearfield acoustic holography : I. Theory of generalized holography and the development of NAH. J.Acoust.Soc.Am. 78(4).

Maynard, J.D. et al. (1987) Nearfield acoustic holography (NAH) : II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation. J.Acoust.Soc.Am. 81(5).

Meltzer, G. et Ivanov, Y.Y. (2003) Fault Detection in Gear Drives With Non-Stationary Rotational Speed – Part II: The Time-Frequency Approach. Mechanical Systems and Signal Processing, 17(2), 273-283.

Mokhtari, M. et Marie, M. (1998) *Applications de Matlab® 5 et Simulink® 2*. France, Springer-Verlag.

Pan, M.-C. et Chen, J.-X. (2003) Transmission noise identification using two-dimensional dynamic signal analysis. Journal of Sound and Vibration, 262, 117-140.

- Qian, S. (2002) *Time-Frequency and Wavelet Transforms*. New Jersey, USA, Prentice Hall.
- Ross, A. et al. (1999) New signal processing developments for low cost near-field acoustical holography systems. *Noise Control Eng. J.* 47(1).
- Ruhala, R.J. et Burroughs, C.B. (1999) *Tire-pavement interaction noise source identification using multi-planar nearfield acoustical holography*. SAE 1999-01-1733, SAE Noise and Vibration Conference and Exposition.
- Sakurai, M., Sakai, H. et Ando, Y. (2001) *A Computational Software for Noise Measurement and Toward Its Identification*. *Journal of Sound and Vibration*, 241(1), 19-27.
- Temple, K.A. (1997) Noise source identification in thermal systems using transient spectral analysis. SAE 972036, Noise and Vibration Conference.
- Thomas M., Archambault R. and Archambault J., October 2003, Modified Julien index as a shock detector : its application to detect rolling element bearing defect, 21th seminar on machinery vibration, CMVA, Halifax (N.S.), 21.1-21.12.
- Trethewey, M.W. et Christofi, C.C. (1987) *Source identification and acoustic modeling of enclosures from experimental data*. SAE 870972, SAE Noise and Vibration Conference.
- Tomlin, M.A. (1999) Partial source discrimination in near field acoustic holography. *Applied Acoustics*, 57, 243-261.
- Wang, L. et Libert, G. A. (1994) Combining Pattern Recognition technique with Akaike's Information Criteria for Identifying ARMA Models. *IEEE Trans. Signal Processing*, 42(6), 50-61.
- Willams, E.G. (1999) *Fourier acoustics, Sound radiation and nearfield acoustical holography*. San Diego, USA, Academic Press.

ANNEXE 1

Filtrage adaptatif de type RLS

La principale utilisation des filtres adaptatifs est de débruiter un signal. L'application utilisée dans cette étude n'est pas la plus courante dans la littérature. Il ne s'agit pas de débruiter un signal mais plutôt d'extraire un signal de référence contenu dans un signal global, ce signal global étant composé de signaux de même nature que le signal de référence. Lors de cette extraction, les propriétés adaptatives des filtres ne seront pas utilisées. Il s'agira plutôt d'une optimisation unique afin de faire converger le plus rapidement possible l'estimé vers le signal de référence. Le filtre le mieux adapté à ce type d'utilisation est le RLS (de l'anglais « Recursive Least Squares ») parce que c'est celui dont l'adaptabilité est la plus rapide.

L'approche des filtres adaptatifs est constituée des 2 étapes suivantes (Haykin, 2002) :

Étape 1 : un processus de filtrage, qui implique le calcul de la sortie d'un filtre linéaire en réponse à un signal donné et le calcul d'un signal d'erreur, qui est en fait la variation entre un estimateur et le signal de référence.

Étape 2 : un processus d'adaptation, qui implique l'ajustement automatique des paramètres du filtre en fonction du signal d'erreur.

La figure 100 montre le schéma bloc du filtrage adaptatif utilisé pour cette étude, soit l'extraction d'un signal de référence ($x_r(k)$) d'un signal global ($x(k)$).

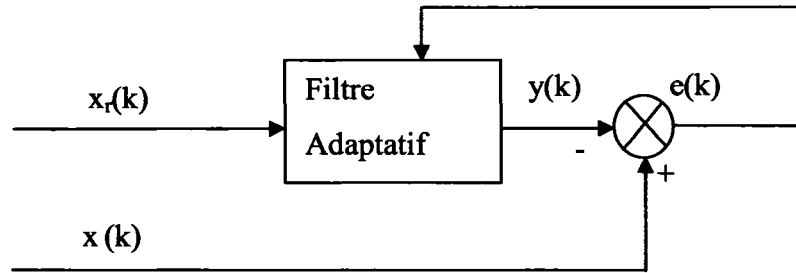


Figure 100 Extraction d'un signal de référence contenu dans un signal global à l'aide d'un filtre adaptatif

Le développement mathématique d'un filtre adaptatif de type RLS est décrit par plusieurs auteurs, dont Mokhtari et Marie (1998), Haykin (2002) et Widrow et Stearns (1985). Les filtres RLS utilisent un gain d'adaptation $g(k)$ dans le processus de minimisation de la fonction de coût $J(k)$. Ce gain d'adaptation sert à utiliser l'information des précédents échantillons. L'algorithme d'un filtre adaptatif de type RLS se résume à :

$$g(k) = \frac{Cxx^{-1}(k-1)x_r(k)}{1 + x_r^T(k)Cxx^{-1}(k-1)x_r(k)} \quad (1)$$

$$Cxx^{-1}(k) = Cxx^{-1}(k-1) - g(k)x_r^T(k)Cxx^{-1}(k-1) \quad (2)$$

$$h(k) = h(k-1) + g(k)[x(k) - h^T(k-1)x_r(k)] \quad (3)$$

$$e(k) = x(k) - h^T(k-1)x_r(k) \quad (4)$$

Au départ de l'algorithme, la matrice Cxx^{-1} est initialisée à cI où I est la matrice identité et c est un coefficient assez élevé pour assurer une convergence rapide de l'algorithme. Les coefficients $h(k)$ sont initialisés à 0. De plus, le coefficient $h(k)$ indique le décalage entre le signal de référence et la source de référence.

Ces équations supposent que le signal étudié est stationnaire, le gain d'adaptation est décroissant et prend rapidement une valeur faible. Un gain d'adaptation faible ne permet plus au filtre de s'adapter efficacement aux variations statistiques du signal d'entrée. Dans le cas de signaux non stationnaires, il faut utiliser un facteur supplémentaire λ appelé facteur d'oubli (Mokhtari et Marie, 1998), « forgetting factor » dans la littérature anglaise (Haykin, 1984 et 2002). Son nom vient du fait qu'il permet d'influencer la mémoire antérieure de l'algorithme de façon à minimiser l'effet des valeurs passées des échantillons du signal par rapport aux valeurs présentes ou à venir. L'algorithme est alors modifié comme suit :

$$g(k) = \frac{\lambda^{-1} C_{xx}^{-1}(k-1) x_r(k)}{1 + \lambda^{-1} x_r^T(k) C_{xx}^{-1}(k-1) x_r(k)} \quad (5)$$

$$C_{xx}^{-1}(k) = \lambda^{-1} C_{xx}^{-1}(k-1) - \lambda^{-1} g(k) x_r^T(k) C_{xx}^{-1}(k-1) \quad (6)$$

$$h(k) = h(k-1) + g(k) [x(k) - h^T(k-1) x_r(k)] \quad (7)$$

$$e(k) = x(k) - h^T(k-1) x_r(k) \quad (8)$$

Il existe 3 types de facteur d'oubli :

1er type : facteur d'oubli fixe, convenant pour les signaux aux variations lentes :

$$0.9 \leq \lambda \leq 0.99 \quad (9)$$

2ème type : facteur d'oubli variable, qui force la pondération sur les échantillons récents mais qui est efficace surtout pour les signaux stationnaires ou quasi-stationnaires :

$$\lambda(k) = K\lambda(k-1) + 1 - K \quad (10)$$

où

$$0.9 \leq K \leq 0.99$$

$$0.9 \leq \lambda(1) \leq 0.99$$

3^{ème} type : facteur d'oubli à trace constante, facteur variant à chaque itération afin de maintenir la trace de la matrice $Cxx^{-1}(k)$ constante, évitant ainsi que le gain d'adaptation tende vers 0. Ce type de facteur d'oubli correspond aux signaux fortement non stationnaires :

$$trace[Cxx^{-1}(k)] = \frac{1}{\lambda(k)} trace[Cxx^{-1}(k-1) - J(k)] \quad (11)$$

Où

$$J(k) = \frac{Cxx^{-1}(k-1) x_r(k) x_r^T(k) Cxx^{-1}(k-1)}{1 + x_r^T(k) Cxx^{-1}(k-1) x_r(k)} \quad (12)$$